

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

# **Balancovací systém pro elektrický motocykl**

## **Battery Management System for Electric Bicycle**

# Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Matěj Golembiovský**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2601T004 Měřicí a řídicí technika

Téma: **Balancovací systém pro elektrický motocykl**  
**Battery Management System for Electric Bicycle**

Jazyk vypracování: čeština

## Zásady pro vypracování:

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací funkčního vzoru balanční jednotky a managementu pro low cost aplikace s volbou možnosti bezdrátové komunikace mezi balancery.

V souhrnu je práce charakterizována následujícími body:

1. Rešerše současného stavu balančních systémů.
2. Návrh a realizace low cost balanční jednotky.
3. Návrh a realizace bezdrátového rozšíření balanční jednotky.
4. Návrh a implementace vizualizačního a konfiguračního rozhraní.
5. Zhodnocení dosažených výsledků.

## Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] RAHN, Christopher D. a Chao-Yang WANG. *Battery Systems Engineering*. 1st ed. Wiley, 2013. ISBN 978-1-119-97950-0.
- [2] POP, V., H. J. BERGVELD, D. DANILOV, P.P.L. REGTIEN a P.H.L. NOTTEN. *Battery Management Systems: Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications*. Philips Research Book Series (Book 9) Springer, 2008. ISBN 978-1402069444.
- [3] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry Atmel AVR ATmega16: měření, řízení a regulace pomocí několika jednoduchých přípravků*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 319 s. ISBN 80-7300-174-8.
- [4] HORÁK, B., K. FRIEDRISCHKOVÁ, J. KAZÁRIK, J. NOWAKOVÁ a Z. SLANINA. *Elektromobilita II, učební text*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3532-7. Dostupné z: [http://netfei.vsb.cz/downloads/autorske\\_texty/Elektromobilita%20II.pdf](http://netfei.vsb.cz/downloads/autorske_texty/Elektromobilita%20II.pdf).
- [5] NORDIC SEMICONDUCTOR - firemní dokumentace. Dostupné z: <http://www.nordicsemi.com>.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Slanina, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016



---

doc. Ing. Jiří Koziolek, Ph.D.  
*vedoucí katedry*

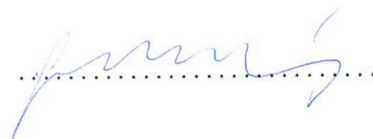


---

prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
*děkan fakulty*

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 29. dubna 2016





Rád bych na tomto místě poděkoval svému vedoucímu práce ing. Zdeňku Slaninovi, Ph.D. za konzultace a vedení této diplomové práce. Taktéž bych rád poděkoval své snoubence, rodině a kamarádům za pomoc a podporu v čase, kdy jsem tuto práci psal.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem systémů pro balancování napětí v akumulátorové baterii. Úvodem bude proveden rozbor problematiky a vysvětlení proč je tato úloha v praxi důležitá. Následně budou nastíněny možnosti řešení této úlohy. Jejich zhodnocení vyústí ve výběr koncepce, která bude použita při návrhu. Při samotném návrhu budou rozebrány a zdůvodněny volby řešení. Bude také kladen důraz na cenovou výhodnost výsledného řešení.

Výsledkem této práce bude hotové řešení balančního systému pro elektrický motocykl.

**Klíčová slova:** BMS, Systém správy baterie, Balanční modul, Akumulátor

## **Abstract**

This diploma thesis deals with battery management system scheme. The introduction consists of analysis of the subject matter and of explanation why is this task important in practical use. Further on, possible solutions for this task will be outlined. Their evaluation will result in a concept that will be used in the scheme. During the proposition of the scheme, the choices made will be analysed and explained. Emphasis will also be put on cost efficiency of the chosen solution.

The outcome of this thesis will be a finished battery management system for electric motorcycle.

**Key Words:** BMS, Battery management system, Balancing module, Battery

# Obsah

<b>Seznam použitých zkratk a symbolů</b>	<b>9</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>10</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>11</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>12</b>
<b>2 Akumulátory</b>	<b>13</b>
2.1 Olověné akumulátory . . . . .	13
2.2 Ni-Mh akumulátory . . . . .	14
2.3 Li-ion akumulátory . . . . .	15
2.4 Shrnutí . . . . .	16
<b>3 Stávající dostupné balanční jednotky</b>	<b>17</b>
3.1 Ochrana článku proti přebití . . . . .	17
3.2 Centrální BMS . . . . .	18
3.3 Modulární BMS . . . . .	18
3.4 Shrnutí . . . . .	19
<b>4 Komunikační protokol</b>	<b>21</b>
4.1 Komunikace s balančními moduly . . . . .	22
4.2 Komunikace s nadřazeným systémem . . . . .	24
<b>5 Balanční modul</b>	<b>26</b>
5.1 Popis zařízení . . . . .	26
5.2 Řídící logika . . . . .	26
5.3 Výkonová část . . . . .	30
5.4 Komunikace . . . . .	32
5.5 Měření provozních parametrů článku . . . . .	39
5.6 Návrh DPS . . . . .	40
5.7 Testy . . . . .	42
<b>6 Řídící jednotka</b>	<b>43</b>
6.1 Hardware . . . . .	43
6.2 Komunikace . . . . .	45

<b>7</b>	<b>Vizualizace</b>	<b>47</b>
7.1	Android . . . . .	47
7.2	Rozdělení aplikace . . . . .	48
7.3	Live view . . . . .	49
7.4	Settings . . . . .	50
7.5	Console . . . . .	51
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>52</b>
	<b>Literatura</b>	<b>53</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>54</b>

## Seznam použitých zkratk a symbolů

A/D převodník	– Analogově digitální převodník
ASCII	– Americký standardní kód pro výměnu informací (American Standard Code for Information Interchange)
AVR	– Architektura mikroprocesoru (Alf (Egil Bogen), Vegard (Wollan) Risc procesor)
BMS	– Systém správy baterie (BATTERY Management System)
BT	– Bluetooth
CAN	– Datová sběrnice (Controller Area Network)
CRC	– Cyklický redundantní součet (Cyclic Redundancy Check)
DPS	– Deska plošných spojů
EEPROM	– Elektricky mazatelná semipermanentní (nevolatilní) paměť (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)
GCC	– Sada překladačů jazyka C (GNU Compiler Collection)
GHz	– Jednotka frekvence
GSM	– Systém pro mobilní komunikaci (Groupe Spécial Mobile)
IAR	– Švédská softwarová společnost (Ingenjörfirman Anders Rundgren)
Li-ion	– Typ akumulátoru (Lithium-ion battery)
Mb/s	– Jednotka přenosové rychlosti
Ni-MH	– Typ akumulátoru (Nickel–Metal Hydride)
NTC	– Negativní teplotní koeficient
OTG	– Na cestách (On-The-Go)
PNP	– Třívrstvá polovodičová struktura pozitivní/negativní/pozitivní vodivosti
PWM	– Pulsně šířková modulace (Pulse width modulation)
RC	– Filtr obsahující rezistor a kondenzátor
RX	– Příjem
SMD	– Metoda povrchové montáže (Surface mount device)
TX	– Vysílání
UART	– Univerzální asynchronní přijímač/vysílač (universal asynchronous receiver/transmitter)
USB	– Univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)
USI	– Univerzální sériové rozhraní (Universal Serial Interface)
XML	– Rozšiřitelný značkovací jazyk (Extensible Markup Language)

## Seznam obrázků

1	Struktura olověného akumulátoru . . . . .	13
2	Struktura Ni-MH akumulátoru . . . . .	14
3	Struktura Li-ion akumulátoru . . . . .	15
4	Ochrana přebití . . . . .	17
5	Centrální BMS . . . . .	18
6	Balancer BMS . . . . .	19
7	Balanční modul . . . . .	20
8	Blokové zapojení BMS . . . . .	27
9	Měření více článků pomocí jednoho mikrokontroléru . . . . .	28
10	Oddělení signálu RX a TX sběrnice UART . . . . .	29
11	První prototyp balančního modulu s Attiny 13 . . . . .	29
12	Vzorkování UART . . . . .	30
13	Simulační schéma v programu OrCAD . . . . .	32
14	Výsledek simulace . . . . .	33
15	Rámec rozhraní UART . . . . .	34
16	Diagram datových toků balančního modulu . . . . .	35
17	Schéma zapojení optočlenu . . . . .	35
18	Přechodová charakteristika optočlenu s napájením 5 a 5V . . . . .	36
19	Přechodová charakteristika optočlenu s napájením 2 a 5V . . . . .	36
20	Přechodová charakteristika optočlenu s napájením 5 a 2 V . . . . .	36
21	Bezdrátový modul s čipem nRF24L01+ . . . . .	37
22	Stavový diagram nRF24L01+ . . . . .	38
23	Vnitřní zapojení vstupního pinu A/D převodníku . . . . .	39
24	Simulace měření teploty . . . . .	40
25	Modul balanceru . . . . .	41
26	Modul galvanického oddělení . . . . .	41
27	Výsledek testů balančního modulu . . . . .	42
28	Blokové schéma zapojení řídicí jednotky . . . . .	44
29	Vývojová platforma Arduino MEGA 2560 . . . . .	44
30	Modul proudového senzoru . . . . .	45
31	Diagram datových toků řídicí jednotky . . . . .	46
32	Životní cyklus aktivity . . . . .	48
33	Ukázka fragmentu sledování provozních parametrů . . . . .	49
34	Ukázka fragmentu nastavení limitů . . . . .	50
35	Ukázka fragmentu Console . . . . .	51
1	Náklady na balanční moduly při výrobě série 100ks . . . . .	I

## Seznam tabulek

1	Druhy akumulátorů . . . . .	16
2	Srovnání BMS . . . . .	20
3	Deklarace jednotek v protokolu komunikace s BMS . . . . .	22
4	Srovnání mikrokontrolérů . . . . .	27

# 1 Úvod

V posledních letech se v souvislosti s rostoucím odvětvím obnovitelných zdrojů a elektromobility zvyšuje také poptávka po akumulátorových systémech. Akumulátorové systémy pro tyto aplikace jsou zatíženy vysokou dynamikou cyklování článku, respektive přechodů z vybíjení do nabíjení a naopak. Tato skutečnost by za předpokladu, že by takový akumulátorový systém nebyl řízen sofistikovaným BMS, mohla vést k předčasnému stárnutí baterie. V situaci kdy nejsou dodrženy maximální a minimální hodnoty napětí na článcích dochází k degradaci těchto článků velice rychle. Při takovém provozu jsou možné také rozsáhlé deformace článků nebo požar. Hlavní úlohou BMS je hlídat provozní parametry baterie a zaručit, že tyto parametry budou v určitých mezích. Toho lze dosáhnout několika způsoby:

- odpojením baterie v kritické situaci - v případě úplného vybití některého článku, překročení maximálního přípustného proudu nebo nedodržení provozních teplot,
- úpravou parametrů zátěže - pokud dokáže BMS komunikovat se zátěží, může se pokusit před úplným odpojením zátěže například snížit odebíraný výkon,
- balancováním napětí článků - omezením napětí již nabitých článků v průběhu nabíjení na maximální přípustné hranici tak, aby bylo možno dobít i zbytek článků.

V této práci je rozebrán postup návrhu BMS, která bude použitelná pro malá elektrická vozidla. Zamýšleno je využití tohoto systému na elektrické koloběžce. Pro vyčítání informací z této BMS bude vyvinut vizualizační systém. Pomocí tohoto systému půjde BMS také konfigurovat.



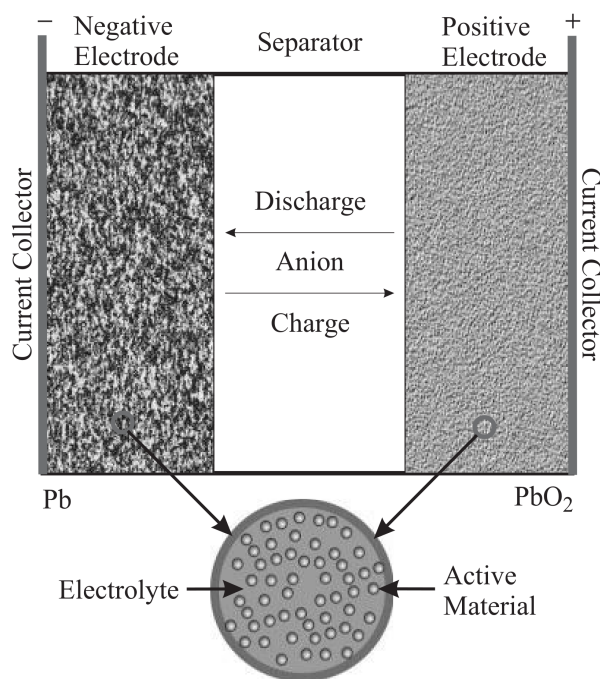
## 2 Akumulátory

Akumulátory umožňují uchovávat elektrickou energii prostřednictvím chemické reakce. Dělíme je hlavně na základě jejich elektrochemického principu. Hlavními zástupci na dnešním trhu jsou:

- Olověné akumulátory
- Ni-Mh akumulátory
- Li-ion akumulátory

### 2.1 Olověné akumulátory

Jak uvádí [1], jedná se o relativně starou technologii. I přesto si však udržuje přibližně 40% podíl na trhu, a to především z důvodu využití této technologie pro startovací akumulátory motorových vozidel. Moderní bezúdržbové typy olověných akumulátorů využívají k zabránění pohybu elektrolytu v článku vysoce pórezní materiály. Tyto materiály musí umožnit vysokou ionickou, avšak nulovou elektrickou vodivost.



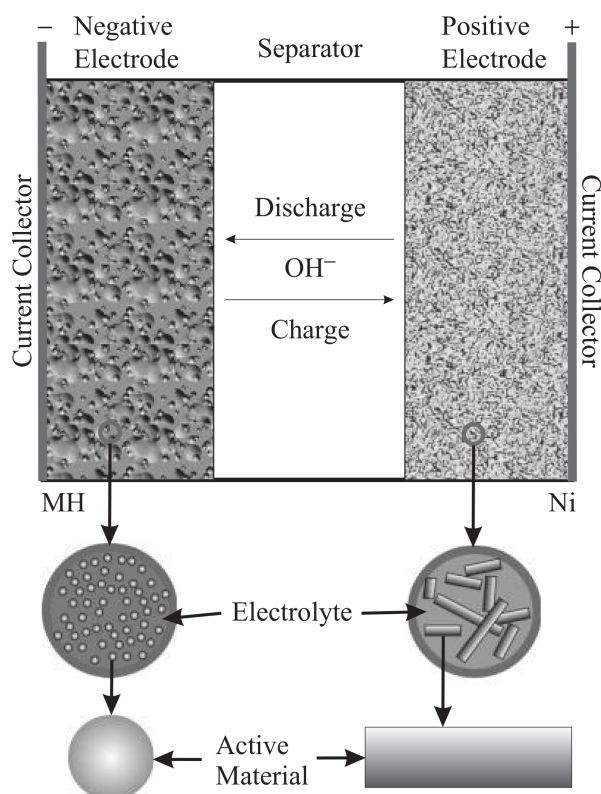
Obrázek 1: Vnitřní struktura olověného akumulátoru (převzato z:[1])

Na obrázku 1 je znázorněna vnitřní struktura olověného akumulátoru. Ten se skládá z kladné a záporné elektrody, které jsou odděleny separátorem sloužícím jako elektrický izolátor. Všechny části jsou pórezní a plně nebo částečně vyplněny elektrolytem. V akumulátoru se také může nacházet plyn, který vznikl jako následek přebíjení nebo podbití článku. Výron plynu uvnitř článku

může vést k nebezpečí při jeho provozu. Důsledkem výronu plynu může být také zkrácení životnosti článku či celé baterie.

## 2.2 Ni-Mh akumulátory

Nabízejí vyšší výkon než olověné akumulátory, ale jsou dražší. Další výhodou je vysoký počet nabíjecích cyklů a také možnost rychlého nabíjení. Z těchto důvodů byly využívány ve vozidlech s hybridním pohonem. Jednou z nevýhod je však jejich relativně vysoký samovybíjecí proud, který má za následek vybíjení akumulátorů i bez připojené zátěže.

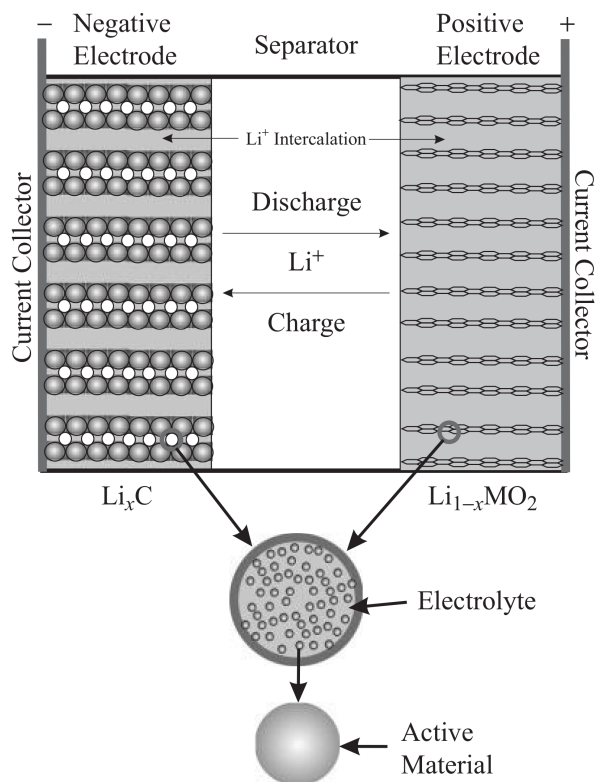


Obrázek 2: Vnitřní struktura Ni-MH akumulátoru (převzato z:[1])

Obrázek 2 ukazuje vnitřní strukturu Ni-MH akumulátoru. Kladná elektroda obsahuje jako aktivní prvek hydroxid niklu. Záporná elektroda je pak složena hlavně ze slitin niklu, které dokážou absorbovat vodík. Mezi elektrodami se nachází elektricky izolující separátor, který je napuštěn alkalickým elektrolytem. Články jsou vyrobeny svinutím separátorem izolovaných elektrod a následným vložením do válcového obalu. Prizmatické články mohou být vytvořeny spojováním článků do větších celků.

### 2.3 Li-ion akumulátory

Li-ion akumulátory v dnešní době dominují trhu především díky jejich vysoké energetické hustotě. Z tohoto důvodu jsou vhodné, především pro využití v oblastech, kde se klade důraz na hmotnost nebo rozměry. Jejich dlouhá životnost a nízký samovybíjecí proud podtrhují využitelnost v nejrozličnějších oborech. Zatím jsou sice relativně drahé, avšak nové chemické složení a masová produkce slibují do budoucna zlepšení i v této oblasti.



Obrázek 3: Vnitřní struktura Li-ion akumulátoru (převzato z:[1])

Na obrázku 3 je znázorněna vnitřní struktura Li-ion akumulátoru.

## 2.4 Shrnutí

Z tabulky 1 je patrné, že akumulátory na bázi technologie Li-ion jsou nejvhodnějším kandidátem pro napájení elektricky poháněných vozidel. Nejen z hlediska energetické hustoty, ale také z důvodu vysokého výkonu, který z těchto akumulátorů můžeme odebírat. Nezanedbatelné je také vyšší napětí článku, které redukuje náklady a problémy se spojováním jednotlivých článků do baterií. Další důležitou vlastností, která zvýhodňuje Li-ion akumulátory je nízký samovybíjecí proud ( $<10\%$ /měsíc).

Tabulka 1: Srovnání parametrů jednotlivých druhů akumulátorů (převzato z:[1])

	Pb-acid	Ni-MH	Li-ion
<i>Theoretical</i>			
Voltage (V)	1.93	1.35	4.1
Specific energy (Wh/kg)	166	240	410
<i>Practical</i>			
Specific energy (Wh/kg)	35	75	150
Energy density (Wh/L)	70	240	400
Coulometric efficiency	0.80	0.65–0.70	$>0.85$
Energy efficiency	0.65–0.70	0.55–0.65	$\sim 0.80$
Specific power, 80% DOD (W/kg)	220	150	350
Power density (W/L)	450	$>300$	$>800$

Návrh BMS byl optimalizován pro články GWL-ZG-LFP020AH [15] kvůli následnému použití v projektu elektrické koloběžky, ve které jsou tyto články osazeny.

### 3 Stávající dostupné balanční jednotky

Kvůli zvyšující se poptávce po akumulátorových systémech obsahujících technologii Li-ion, je na trhu dostupná celá řada systémů BMS které zaručí, že jsou jednotlivé články provozovány v předepsaných podmínkách. V této kapitole budou vybrány produkty z několika kategorií BMS a budou zhodnoceny některé jejich vlastnosti. Výsledkem bude seznam požadavků, ze kterých bude vycházeno při návrhu vlastního řešení balančního systému.

#### 3.1 Ochrana článku proti přebití

Jedná se zpravidla o velice jednoduché systémy, jak je možno vidět na obrázku 4. Obvod, který vyhodnocuje napětí článku při dosažení určitého napětí, sepne tranzistor, prostřednictvím kterého se napětí článku přivede na výkonový rezistor. Ten odvede nabíjecí proud a článek se přestane nabíjet. V praxi by měl být proud tekoucí výkonovým rezistorem větší než nabíjecí proud, aby bylo zajištěno, že se příslušný článek nepřebije. V takovém případě je v čase balancování článek pomalu vybíjen a při dosažení nižšího napětí (takového, aby v článku zůstalo více než 95 % kapacity) je výkonový odpor od článku opět odpojen. Pokud touto dobou již nejsou všechny články nabity, celý proces se opakuje.



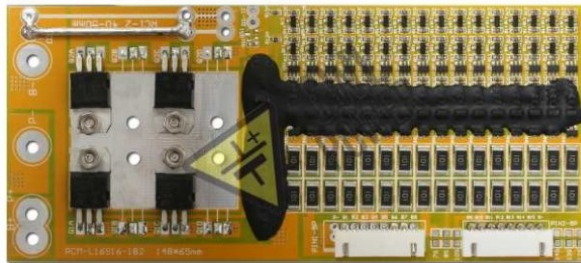
Obrázek 4: Ochrana článku proti přebití (převzato z:[12])

Tento způsob hlídání článků však postrádá jakoukoli ochranu článku proti podbití. Aby se jednotlivé články nepoškodily, je třeba počítat s jejich nižší kapacitou. Takové řešení však potřebuje přídavnou elektroniku, která bude hlídat energii odebranou z baterie. Ve výsledku není možné bezpečně využít plnou kapacitu baterie.

### 3.2 Centrální BMS

Způsob balancování je shodný s výše zmíněnými ochranami. Na rozdíl od výše zmíněných ochran proti přebití, však poskytují více funkcionality. Především jsou schopny odpojit akumulátory od zátěže. Tato vlastnost umožňuje implementovat funkce jako:

- Ochranu vůči podbití
- Ochranu proti nadproudu
- Ochranu proti zkratu



Obrázek 5: Centrální BMS (převzato z:[11])

Celé řešení je velice kompaktní. Jednotlivé balanční jednotky, výkonové spínací prvky, proudové senzory i vyhodnocující elektronika se nachází na jedné DPS. Z toho však vyplývá fakt, že se jedná o velice specializované řešení. Například je zde obvykle možnost výběru pouze z několika variant, které podporují 8, 12 nebo 16 článků. Další omezení maximálního proudu, který je možno z článku odebírat, je pevně dané spínacím prvkem. Je tedy nutné volit vhodné články. Při potřebě navýšení kapacity akumulátoru, se kterou se zpravidla zvyšuje i možný odebíraný proud, pak není možno využít plného potenciálu akumulátoru.

### 3.3 Modulární BMS

Umožňují velice jednoduše sestavit celý systém na míru požadované baterii. Systém se skládá ze samostatných modulů balanční jednotky, které zajišťují ochranu proti přebití a dokáží řídicí jednotce předávat provozní informace o jednotlivých článcích. Moduly balančních jednotek

jsou zpravidla umístěny blízko příslušného článku a jsou propojeny s řídicí jednotkou pomocí sběrnice. Další důležitou částí BMS je řídicí jednotka. Sbírá všechna data z balančních modulů a vyhodnocuje stav baterie. K řídicí jednotce je většinou připojen také senzor proudu, který monitoruje proud tekoucí baterií. Jelikož tento druh BMS zpravidla dokáže poskytovat informace o stavu baterie nadřazenému systému, je mnohdy možné jej vybavit také vizualizačními prostředky.



Obrázek 6: Baterie vybavená modulární BMS (převzato z:[13])

Na trhu existuje celá řada systémů, které mezi sebou sice nejsou kompatibilní, avšak většina modulů je konfigurovatelných, nebo jsou prodávány ve více verzích lišících se například rozsahem provozních hodnot. Typicky senzor proudu může být dodáván ve více variantách. Je tedy nutné jej vybírat v závislosti na požadovaném maximálním proudu, který bude baterie dodávat, případně na požadovaném minimálním rozlišení proudu v systému. Pokud hovoříme o balančních modulech je zde hlavním parametrem maximální balanční proud. Balanční napětí je u většiny systémů možno nastavit softwarově.

### 3.4 Shrnutí

Z tabulky 2 je patrné, že modulární systém poskytuje mnoho výhod. Od možnosti přizpůsobení pro danou baterii, po snadné vyčtení provozních parametrů nadřazeným systémem.

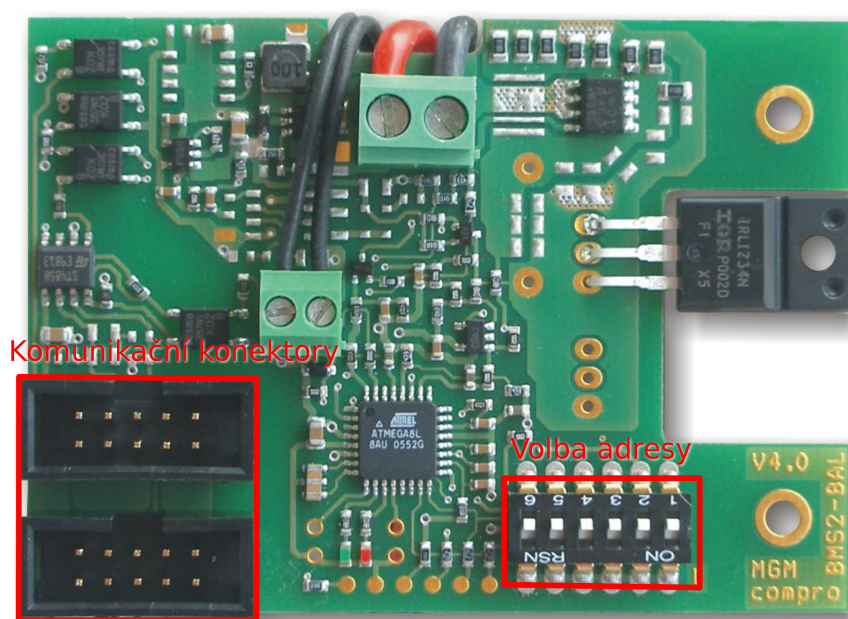
Základním požadavkem při použití v automobilové technice je také mechanická odolnost. Jelikož bude vyvíjený systém provozován na jednostopém dopravním prostředku, je nutné, aby odolával především vibracím. Především zkušenosti s moduly firmy MGM compro ukázaly, že klíčový je především výběr konektorů.

Z obrázku 7 je zřejmé, že pro komunikační sběrnici jsou použity konektory, které jsou původně určeny pro výpočetní techniku. Také volba adresy modulů je řešena prostřednictvím mechanických přepínačů. V praxi, při využití v elektromobilu jsou tyto prvky nespolehlivé, způsobují výpadky BMS a odpojení zátěže od baterie.



Tabulka 2: Srovnání parametrů jednotlivých druhů BMS

	Ochrana přebíť	Centrální BMS	Modulární BMS
Balanční proud	1.7 A	72 mA	300 mA - 10 A
Ochrany	Přebíť	Přebíť, podbíť	Přebíť, podbíť, nadproud, teplota
Maximální proud	-	7 - 60 A	Podle proudového čidla a kontaktoru
Komunikace	-	-	CAN, GSM, BT, USB, UART
Cena/článek	120 Kč	76 - 325 Kč	470 - 2000 Kč



Obrázek 7: Balanční modul firmy MGM compro (převzato z:[14])

V této práci je při návrhu BMS k těmto okolnostem přihlédnuto. Zvolené řešení výše uvedené problémy eliminuje. Pro navrhovaný systém je použita koncepce modulární BMS, hlavně z důvodu modularity a širokých možností propojení s nadřazeným systémem. Byl také kladen značný důraz na nízkou cenu výsledného řešení.



## 4 Komunikační protokol

Aby měla řídicí jednotka k dispozici veškeré provozní parametry baterie, musí spolu jednotlivé části BMS, tedy balanční moduly a řídicí jednotka, komunikovat.

Pro zabezpečení bezchybného přenosu byl navržen komunikační protokol, který je chráněn kontrolním součtem CRC. Tento protokol byl navržen tak, aby splňoval požadavky na komunikaci především mezi řídicí jednotkou BMS a jednotlivými balančními moduly. Ukázalo se však, že je možné jej použít i pro komunikaci řídicí jednotky s nadřazeným systémem. V tabulce 3 jsou určeny jednotky použité při komunikaci.

Struktura zprávy:

**\*<typ zprávy><data 1>;...;<data n>;<CRC>;**

- \* – start byte
- typ zprávy – jeden ASCII znak mimo \*
- data – hexadecimální číslo kódované pomocí ASCII
- ; – oddělení jednotlivých datových polí
- CRC – hexadecimální číslo kódované pomocí ASCII

---

```
uint8_t _crc_ibutton_update(uint8_t crc, uint8_t data){
    uint8_t i;

    crc = crc ^ data;
    for (i = 0; i < 8; i++)
    {
        if (crc & 0x01)
            crc = (crc >> 1) ^ 0x8C;
        else
            crc >>= 1;
    }

    return crc;
}
```

---

### Výpis 1: Výpočet CRC

Pro ochranu relativně krátkých zpráv byl použit 8 bitový kontrolní součet CRC. Pro výpočet je použit algoritmus z výpisu 1. CRC je aktualizováno pro všechny znaky zprávy, kromě znaku oddělení kolem samotné hodnoty CRC a této hodnoty. Přijatá zpráva může být posléze

Tabulka 3: Deklarace jednotek v protokolu komunikace s BMS

Veličina	Použitá jednotka	Rozsah	V základní jednotce
Teplota	d °C	<-32768;32767>	<-3276,8;3276,7> °C
Proud	cA	<-32768;32767>	<-327,68;327,67> A
Výkon	W	<-32768;32767>	<-32768;32767> W
Napětí	mV	<0;65535>	<0;65,535> V
Celková Energie	dWh	<0;65535>	<0;6553,5> Wh
Zbývající Energie	dWh	<0;65535>	<0;6553,5> Wh

jednoduše verifikována. Pokud nastane při přenosu chyba, je právě přenášená zpráva ignorována. U některých zpráv tak musí být hlídáno překročení času na odpověď. Pokud dojde k překročení času, je zpráva odeslána znovu, nebo je vyhlášen chybový stav.

## 4.1 Komunikace s balančními moduly

Řídicí jednotka a balanční moduly jsou propojeny sběrnici. Komunikace na této sběrnici je vždy inicializována řídicí jednotkou (master). Balanční moduly (slave), odpovídají na dotazy řídicí jednotky. Přístup na sběrnici je tedy half-duplex. Aby mohly být jednotlivé balanční moduly rozlišeny, mají v paměti EEPROM uloženou unikátní adresu. Přidělení této adresy se děje při sestavení baterie. Pokud by bylo zapotřebí některý z balančních modulů vyměnit, je nutno do něj pomocí příslušné zprávy nahrát správnou adresu.

Následuje popis jednotlivých zpráv, které mohou tvořit komunikaci.

### 4.1.1 Cyklická komunikace

Slouží k vyčítání provozních parametrů akumulátorů. Master cyklicky oslovuje všechny slave zařízení pomocí jejich adresy, ty mu posléze posílají odpovědi s aktuálními hodnotami měřených parametrů akumulátoru.

Master:

---

```
*s<address>;<CRC>;
```

---

Slave:

---

```
*S<address>;<voltage>;<temperature>;<microcontroller temperature>;<status>;<CRC>;
```

---

### 4.1.2 Uspání balančních modulů

Balanční moduly je možno uspat, v případě že baterie není využívána. Tento proces pomáhá šetřit energii uloženou v baterii. Jakákoli následná komunikace uvede balanční moduly do aktivního režimu.

Master:

---

\*1<CRC>;

---

#### 4.1.3 Zjištění adresy balanční jednotky

Tento mechanismus je implementován především k servisním účelům. Je zamýšlen pro použití na balančním modulu, který je odpojen od komunikační sběrnice BMS. Master (servisní jednotka) je připojen pouze k jedné balanční jednotce. Umožňuje zjistit aktuální adresu balanční jednotky.

Master:

---

\*a<CRC>;

---

Slave:

---

\*A<address>;<CRC>;

---

#### 4.1.4 Změna adresy balanční jednotky

Slouží ke změně adresy balanční jednotky především ve fázi konfigurace baterie, případně při servisním zásahu.

Master:

---

\*c<old address>;<new address>;<CRC>;

---

Slave:

---

\*C<old address>;<new address>;<CRC>;

---

#### 4.1.5 Nastavení hraničních napětí

Umožňuje nastavit napětí, při kterém začne balanční modul balancovat a také napětí, při kterém pošle požadavek na odpojení zátěže řídicí jednotce. Tato schopnost umožňuje použití balančního modulu s různými typy akumulátoru.

Master:

---

\*b<address>;<max voltage>;<min voltage>;<CRC>;

---

Slave:

---

\*B<address>;<max voltage>;<min voltage>;<CRC>;

---

## 4.2 Komunikace s nadřazeným systémem

BMS může fungovat jako samostatná jednotka, která chrání baterii před poškozením v důsledku nevhodných provozních podmínek. Z podstaty věci, tak musí mít k dispozici množství informací, které ukazují na aktuální stav baterie. Z tohoto důvodu byl integrován také komunikační protokol, který umožňuje sdílet tyto provozní informace se systémem, ve kterém je baterie integrována. Nadřazený systém pak může upravovat své provozní parametry na základě stavu baterie, či o něm informovat uživatele.

V dalším popisu figuruje řídicí jednotka BMS jako slave a nadřazený systém jako master.

### 4.2.1 Souhrn

Řídicí jednotka BMS cyklicky odesílá provozní informace o baterii nadřazenému systému. Tato zpráva je odesílána každou sekundu. Nadřazený systém tak má aktuální informace o stavu baterie.

Slave:

---

```
*G<voltage>;<current>;<temperature>;<power>;<max energy>;<avalible energy>;<CRC>;
```

---

### 4.2.2 Napětí

Tato zpráva obsahuje jednotlivé napětí každého článku. Je odesílána za souhrnem v případě, že je baterie nabíjena, nebo na vyžádání nadřazeného systému.

Master:

---

```
*v<CRC>;
```

---

Slave:

---

```
*V<number of cells>;<voltage 1>;...;<voltage n>;<CRC>;
```

---

### 4.2.3 Teploty

Tato zpráva obsahuje jednotlivé teploty každého článku. Je odesílána za souhrnem v případě, že je baterie nabíjena, nebo na vyžádání nadřazeného systému.

Master:

---

```
*t<CRC>;
```

---

Slave:

---

```
*T<number of cells>;<temperature 1>;...;<temperature n>;<CRC>;
```

---

#### 4.2.4 Vyčtení limitů

Umožňuje nadřazenému systému vyčíst limitní hodnoty baterie. Nadřazený systém tak může například předvyplnit formulář pro nastavení nových limitních hodnot těmi stávajícími.

Master:

---

```
*r<CRC>;
```

---

Slave:

---

```
*R<max current>;<max voltage>;<min voltage>;<CRC>;
```

---

#### 4.2.5 Nastavení limitů

Umožňuje změnu limitních hodnot baterie nadřazeným systémem.

Master:

---

```
*w<max current>;<max voltage>;<min voltage>;<CRC>;
```

---

Slave:

---

```
*W<max current>;<max voltage>;<min voltage>;<CRC>;
```

---

## 5 Balanční modul

Úlohou balančního modulu je zajistit, aby byly jednotlivé články akumulátorové baterie provozovány v podmínkách, které by příliš nezkracovaly jejich životnost. Kritické veličiny na které je třeba se při plnění tohoto úkolu zaměřit, jsou hlavně dodržení provozních napětí na jednotlivých člancích, teplota, tlak uvnitř článku a proud, který článkem protéká.

Zatímco napětí a proud článku je relativně jednoduché měřit, s teplotou a tlakem uvnitř článku je to složitější. Naštěstí tyto parametry nejsou pro životnost kritické, takže od měření tlaku bylo odstoupeno z důvodu obtížného provedení a teplota je měřena pouze přibližně pro ulehčení mechanické montáže balančního modulu.

### 5.1 Popis zařízení

Navrhovaná struktura BMS je znázorněna na obrázku 8. Z tohoto obrázku je patrné, že proud protékající jednotlivými články bude téměř za všech okolností stejný a není třeba jej měřit u každého článku zvlášť. Úlohou balančního modulu tedy zůstává:

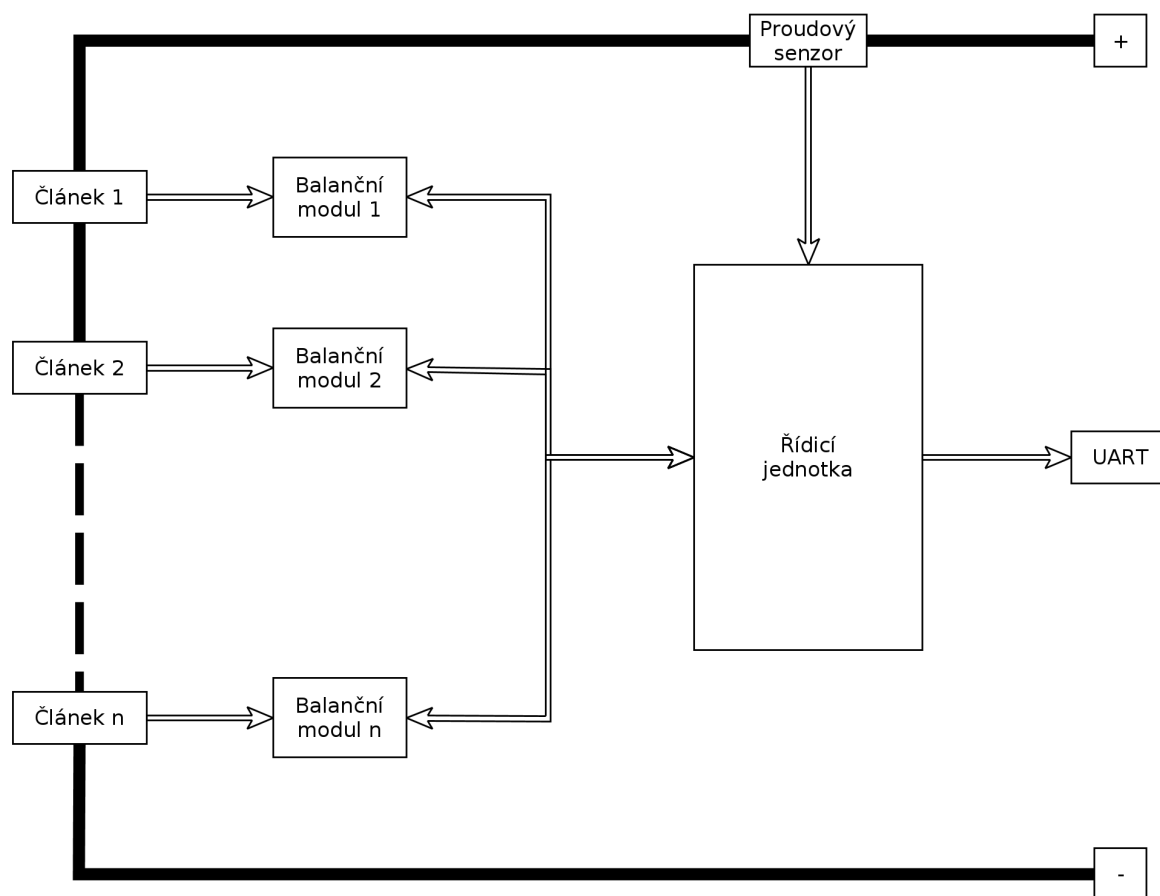
- měření napětí článku,
- měření teploty článku,
- balancování napětí na jednotlivých člancích v konečné fázi nabíjení.

Jediná situace, kdy může jednotlivými články protékat rozdílný proud, nastává ve fázi balancování článků. V této fázi je nabíjecí proud omezen řídicí elektronikou na úroveň, kterou jsou schopny balanční moduly přemostit mimo článek a vzniklý výkon vyzářit v teple. Pro řízení balančního proudu se využívá měření napětí na článku. Pokud napětí stoupá, balanční proud není dostatečný a přes článek i nadále prochází nabíjecí proud, balanční proud je tedy třeba zvětšit. V případě klesajícího napětí článku je naopak balanční proud moc velký.

Nesporná výhoda navrhované konfigurace (obrázek 8) je přesnost měření napětí článku. Jelikož má každý balanční modul k dispozici vlastní A/D převodník s napětovou referencí vztaženou k potenciálu měřeného článku, není třeba odečítat potenciál veškerých článků, které se nacházejí mezi záporným pólem baterie a měřeným článkem. Takovou situaci lze vidět na obrázku 9 u článků, které jsou blíže kladnému pólu baterie. Rozsah A/D převodníku se tím rozdělí mezi více článků. V důsledku této skutečnosti připadá na článek, který chceme měřit, menší část rozsahu A/D převodníku. Tato skutečnost vede ke snížení přesnosti měření napětí daného článku.

### 5.2 Řídící logika

Pro řízení balanční jednotky bude využit mikrokontrolér. Při jeho výběru padla volba na architekturu AVR, jelikož autor má dlouhodobé zkušenosti s jejím programováním. Při výběru vhodného modelu byly zohledněny dostupné periferie se zaměřením na úlohu balancování, sběru



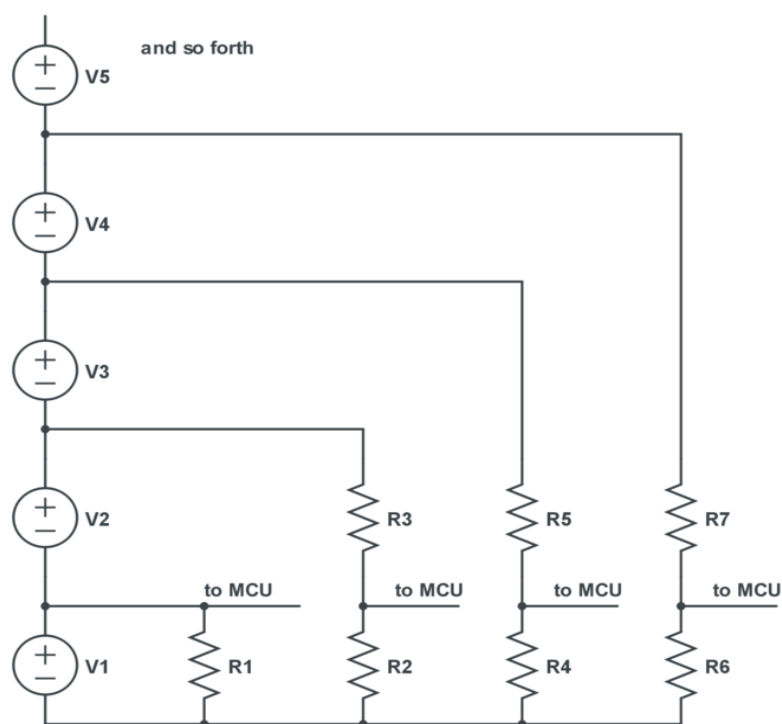
Obrázek 8: Blokové zapojení BMS

dat o stavu článku a komunikaci. Hlavním zohledněným kritériem byla také cena. Nakonec byly vybrány tři možnosti jejichž parametry jsou zaneseny v tabulce 4.

Tabulka 4: Srovnání vybraných mikrokontrolérů

Mikrokontrolér	Attiny 13	Attiny 44	Atmega 48
Pouzdro	SOIC 8	SOIC 14	TQFP 32
I/O	6	12	23
Komunikace	Jen SW	USI	UART, SPI, I2C
Teplotní senzor	NE	ANO	ANO
Cena(Kč)	15,67	19	25,86

Spotřeba je u všech vybraných mikrokontrolérů srovnatelná. Pro výběr vhodného mikrokontroléru byly tedy provedeny testy možností komunikace. Jelikož je při konstrukci důležitá nízká cena, byly vybrané možnosti testovány v pořadí od nejnižší ceny. Jak je uvedeno v kapitole 5.4,



Obrázek 9: Měření více článků pomocí jednoho mikrokontroléru (převzato z: [16])

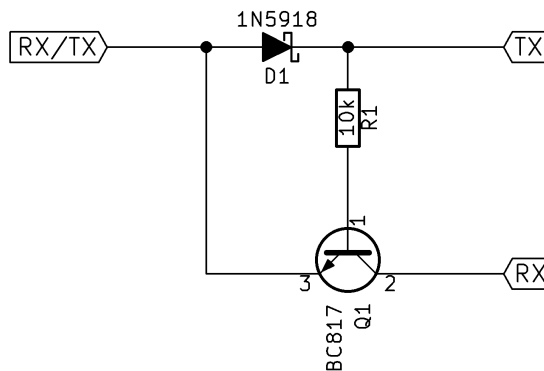
základním komunikačním rozhraním byl zvolen UART.

### 5.2.1 Attiny 13

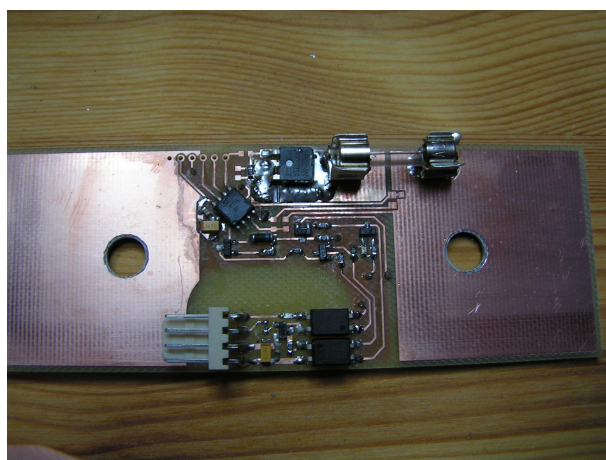
Integrace mikrokontroléru Attiny 13[6] přináší hned několik výzev. Malý počet vstupně-výstupních pinů mikrokontroléru nechává po připojení všech ostatních obvodů balančního modulu, ke komunikaci pouze jeden pin. I přesto, že je komunikace po sběrnici BMS typu half-duplex, je nutné signály RX a TX sběrnice UART oddělit, aby bylo možné balanční modul galvanicky oddělit. K tomuto účelu byl navržen jednoduchý obvod znázorněn na obrázku 10.

Další nevýhodou použití mikrokontroléru Attiny 13 je absence hardwarového komunikačního rozhraní. Z toho důvodu byla napsána knihovna, která softwarově vytváří na jednom z pinů mikrokontroléru half-duplex rozhraní UART. Tato knihovna byla následně testována na prvním prototypu balančního modulu (obrázek 11). Ačkoli byla knihovna psána co nejúspěšněji, při komunikaci více modulů nezbývalo dost procesorového času pro řešení dalších úkolů balanční jednotky.





Obrázek 10: Oddělení signálu RX a TX sběrnice UART



Obrázek 11: První prototyp balančního modulu s Attiny 13

### 5.2.2 Attiny 44

Hardwarová výbava mikrokontroléru Attiny 44[7] je výrazně štedřejší. Kromě čtyřnásobné paměti programu a většího počtu vstupně-výstupních pinů, je zde i modul pro sériovou komunikaci (USI). I když modul nebyl původně zamýšlen pro rozhraní UART, výrobce poskytuje aplikační poznámku[5], jakým způsobem se dá protokol s využitím tohoto modulu implementovat.

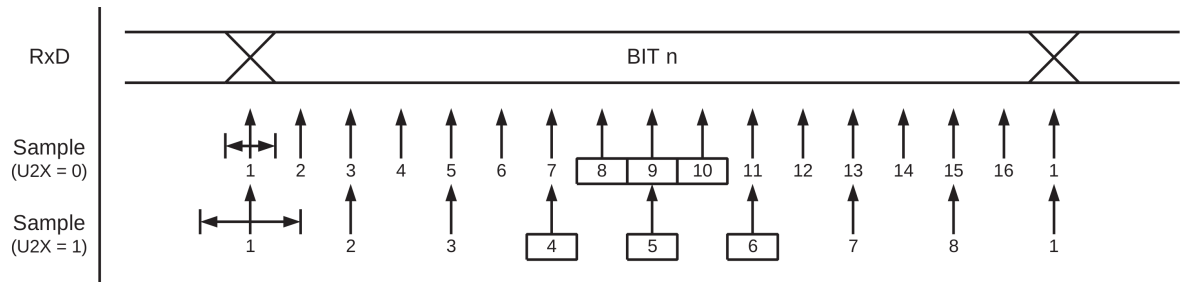
Příklad implementace tohoto rozhraní byl přepsán tak, aby podporoval modul USI mikrokontroléru Attiny 44, který se od modulu v aplikační poznámce mírně liší. Další změny musely být provedeny kvůli kompilátoru GCC, který používá jinou syntaxi pro přístup k částem paměti než kompilátor IAR, pro který byla původní knihovna napsána.

Přes veškerou snahu se však nepodařilo komunikaci s tímto mikrokontrolérem zprovoznit. Problémem se ukázal být nestabilní vnitřní RC oscilátor mikrokontroléru. Při konfiguraci oscilátoru, která je vyžadována pro fungování dalších částí balančního modulu, byly v přenosu často přítomny chyby, které znemožňovaly komunikaci balančního modulu a řídicí jednotky. Řešením

tohoto problému by mohla být integrace externího krystalu pro generování hodinového signálu. To by však neúměrně navýšilo cenu balančního modulu.

### 5.2.3 Atmega 48

Mikrokontrolér Atmega 48[8] má k dispozici hardwarový modul pro komunikační sběrnici UART. Jeho největší předností je, oproti modulu USI mikrokontroléru Attiny 44, schopnost každý přenášený bit navzorkovat vícekrát. Tato vlastnost je výhodná pro potlačení šumu, ale také pro resynchronizaci příjmu při každé hraně signálu. Vzorkování signálu je vidět na obrázku 12. Díky tomu není potřeba externí krystal, který slouží jako zdroj hodinového signálu.



Obrázek 12: Vzorkování přijímaného bitu na sběrnici UART mikrokontroléru Atmaga 48 (převzato z: [8])

Mikrokontrolér Atmega 48 je nakonec zvolen pro finální realizaci balančního modulu.

## 5.3 Výkonová část

Tato část má za úkol odvést přebytečný nabíjecí proud z cesty článku, který je již plně nabitý. Jelikož je potřeba udržet na článku konstantní napětí, byl jako aktivní prvek použit tranzistor pracující v lineárním režimu.

Požadavky na balancování:

- maximální napětí článku 3,6 V (vychází z [15]),
- balanční proud 500 mA.

Z výše uvedených požadavků vyplývá, že ztrátový výkon na balanční jednotce bude:

$$P_{bal} = U_{bal} \cdot I_{bal} = 3,6 \cdot 0,5 = 1,8 \text{ W}$$

Pro ovládání aktivního prvku bude použito PWM signálu generovaného mikrokontrolérem a vyfiltrovaného pomocí filtru typu dolní propust na stejnosměrnou hodnotu. V tomto případě byl použit jako aktivní prvek bipolární PNP tranzistor. Tento typ byl zvolen na základě dvou kritérií.

- Nízké napájecí napětí mikrokontroléru a tedy i ovládacího signálu. Z tohoto důvodu není vhodné použít unipolární tranzistor, který má typicky relativně vysoké otevírací napětí.
- Možnost odvedení přebytečného tepla z tranzistoru pomocí kontaktu akumulátoru. U SMD tranzistorů má typicky nejmenší tepelný odpor vývod kolektoru. Jelikož u kladného pólu akumulátoru bude umístěn jistící prvek, který přeruší vedení tepla pomocí mědi na DPS, je nutné pro odvod tepla použít záporný pól článku. Toto kritérium nás omezuje na použití tranzistoru PNP.

Aby byl eliminován pokles napětí na předřazeném filtru typu dolní propust v důsledku jeho zatížení báze proudem výkonového tranzistoru, bylo realizováno zapojení emitorového sledovače, které sníží jeho výstupní impedanci.

Nyní je nutno převést napěťový signál z filtru typu dolní propust na proudový. Toho nejjednodušeji docílíme emitorovým rezistorem výkonového tranzistoru, který nám vytvoří zápornou zpětnou vazbu. Toto zapojení má však nevýhodu a tou je výkonová ztráta na tomto rezistoru. Této vlastnosti však bylo využito ke snížení ceny balanční jednotky. Jelikož jsou součástky s nižším maximálním ztrátovým výkonem levnější, rozdělíme ztrátový výkon balanční jednotky mezi tranzistor a jeho emitorový odpor tak, aby byla jejich cena co nejmenší.

Výraznější cenová změna v souvislosti s maximálním ztrátovým výkonem je u PNP tranzistoru 1,3 W a u rezistoru 1 W. Aby nebyly tyto výkonové součástky zatěžovány až na hranice svých možností byl kladen důraz na rozdělení výkonu tak, aby obě součástky byly zatíženy přibližně na 80 % své nominální hodnoty maximálního ztrátového výkonu.

$$P_{Q2} = 1,3 \cdot 0,8 = 1,04 \text{ W}$$

$$P_{R2} = 1,0 \cdot 0,8 = 0,8 \text{ W}$$

$$P_{celk} = P_{Q2} + P_{R2} = 1,84 \text{ W}$$

Již dříve byl spočten potřebný ztrátový výkon balanční jednotky na 1,8 W. Vybraná dvojice součástek tedy bude s dostatečnou rezervou výkonově dostačovat. Nyní je třeba navrhnout konkrétní hodnotu rezistoru R2.

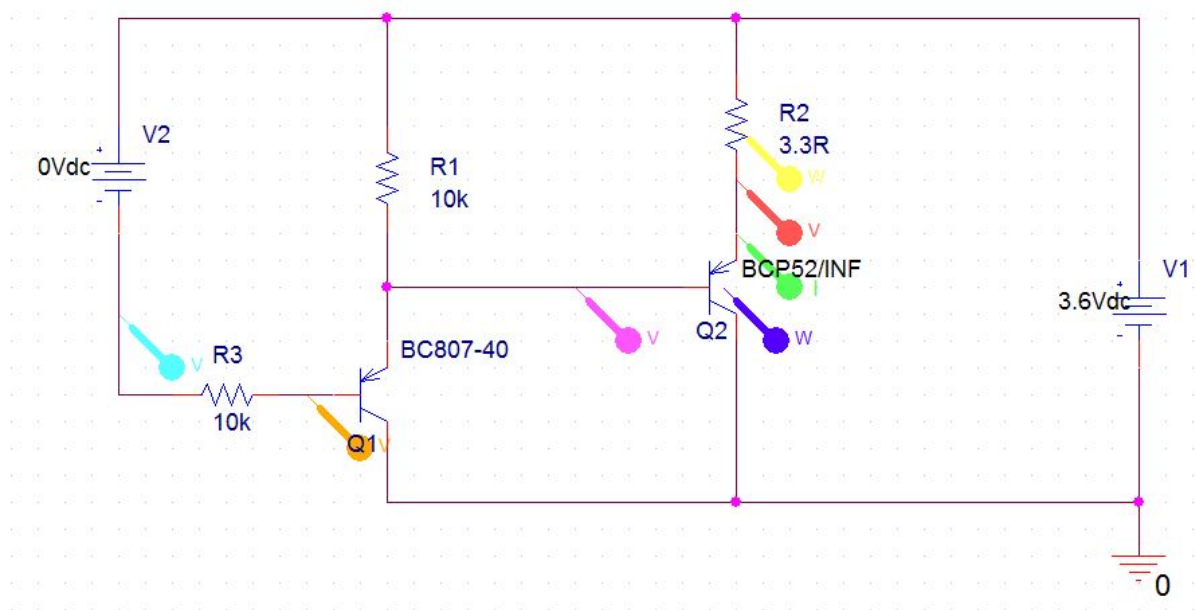
$$R2 = P_{R2} / I_{bal}^2 = 0,8 / 0,5^2 = 3,2 \Omega$$

Byla zvolena nejbližší hodnota z řady E12 tedy 3,3  $\Omega$ . Pro kontrolu byly přepočteny změny poměrů výkonů v obvodu.

$$P_{R2} = R2 \cdot I_{bal}^2 = 3,3 \cdot 0,5^2 = 0,825 \text{ W}$$

$$P_{Q2} = P_{bal} - P_{R2} = 1,8 - 0,825 = 0,975 \text{ W}$$

Zaokrouhlením rezistoru do řady E12 se část výkonu přesunula na rezistor R2. Tato změna však není fatální vzhledem výkonové rezervě, která byla na rezistoru určena.



Obrázek 13: Simulační schéma v programu OrCAD

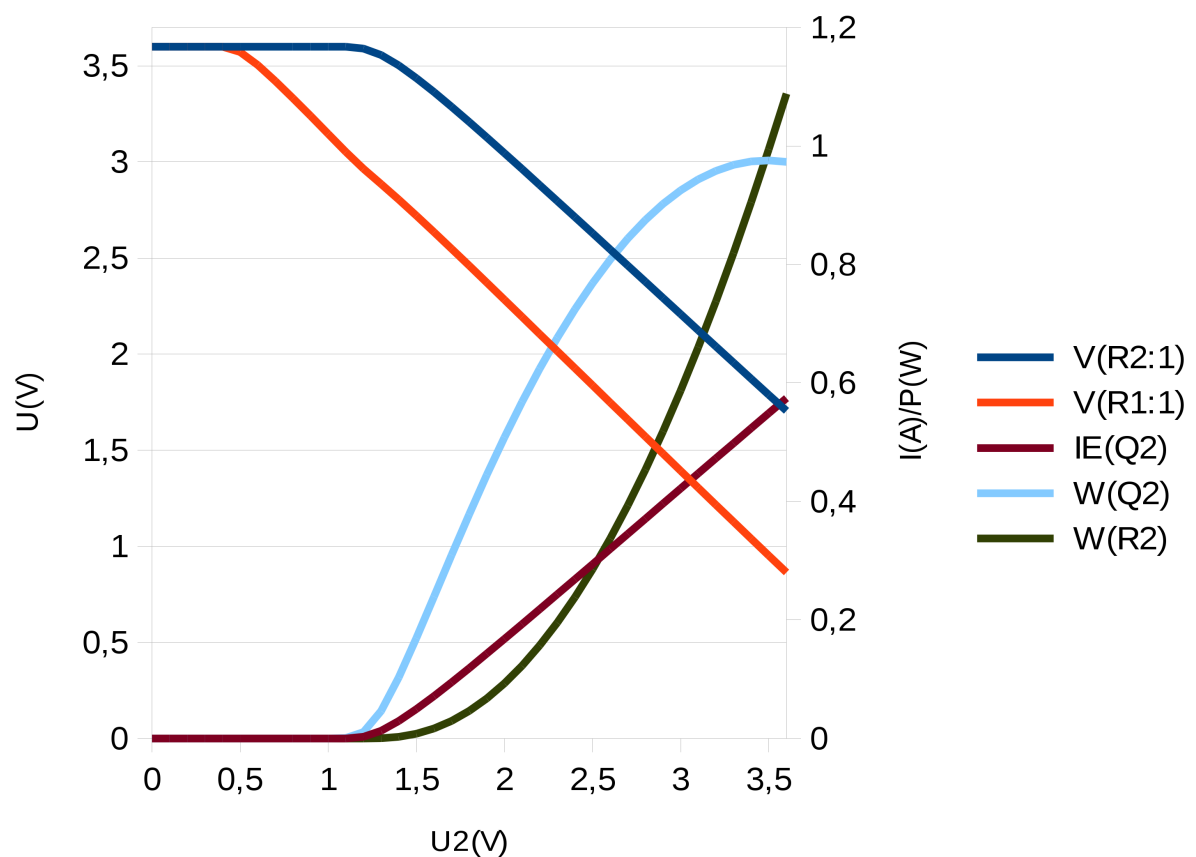
Pro ověření parametrů obvodu s navrhnutými součástkami byla provedena simulace v programu OrCAD. Na obrázku 13 je vidět simulační schéma výkonové části. Pro ovládání výkonové části je využit PWM výstup mikrokontroléru, který je převeden na analogovou hodnotu pomocí RC filtru typu dolní propust. Tato konfigurace je v simulaci nahrazena napěťovým zdrojem V2 a sériovým rezistorem R3.

Výsledek simulace je znázorněn na obrázku 14. Z grafu je patrné, že pracovnímu rozsahu proudu 0-500 mA odpovídá ovládací napětí na výstupu filtru typu dolní propust 1,25-3,25 V. Tento rozsah, by mohl být upraven změnou zesílení emitorového sledovače a úpravou jeho pracovního bodu. Toto řešení, by však vedlo na složitější a dražší zapojení. Pracovní rozsah bude tedy ošetřen firmwarem.

## 5.4 Komunikace

Jelikož je každý balanční modul napájen z článku, jehož parametry zpracovává, má tedy jiný zemní potenciál než řídicí jednotka a ostatní balanční moduly. Je tedy nutné použít galvanicky oddělený komunikační kanál. Zde je na výběr z několika možností.

- Optočleny - tyto byly vybrány jako jedna z možností, a to kvůli nízké ceně součástkové základny a odolnosti vůči vnějším vlivům.



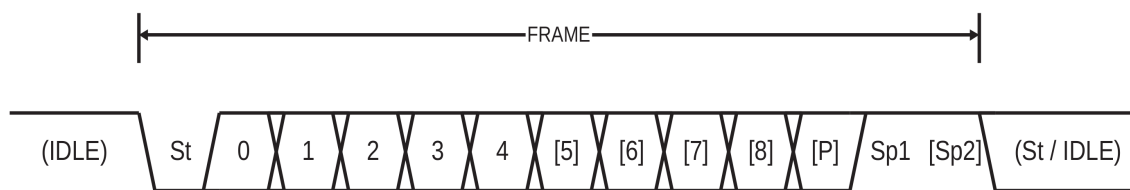
Obrázek 14: Výsledek simulace

- Bezdrátová infračervená komunikace - byla zavrhnuta kvůli komplikovanému odstínění okolních vlivů, především pak přeslechů mezi jednotlivými balančními moduly.
- Bezdrátová radiová komunikace - byla vybrána jako jedna z možností. Přínosem je snadná montáž balančních modulů a šetření kabeláže.
- Izolační transformátory - zavrhnuty kvůli vysoké ceně transformátorů podpůrných obvodů a složitosti.

Jak již bylo v kapitole 5.2.3 při výběru mikrokontroléru naznačeno, bylo jako základ pro komunikační sběrnici zvoleno rozhraní UART. Jedná se o jednoduché rozhraní pro sériový přenos dat, které je hojně zastoupeno i v řadě levných mikrokontrolérů. Základ přenosu tvoří rámec znázorněný na obrázku 15.

Rámec obsahuje:

- start bit - slouží k určení začátku rámce a synchronizaci přijímače,
- 5-9 datových bitů - přenášená data,



Obrázek 15: Rámec přenášený rozhraním UART (převzato z: [8])

- paritní bit - není povinný, lze zvolit lichou, sudou nebo žádnou paritu,
- 1-2 stop bity - signalizují konec rámce.

Pro komunikační sběrnici byly zvoleny následující parametry přenosu. Rychlost přenosu 9600 bd, 8 datových bitů, 1 stop bit, bez parity. Přenos není nutné chránit paritním bitem, jelikož je v komunikačním protokolu, popsaném v kapitole 4, implementován ochranný součet CRC.

Na obrázku 16 je znázorněn diagram datových toků uvnitř balančního modulu. Data ze sběrnice jsou přijímány do bufferu. Pokud je modul ve stavu spánku, jakákoli aktivita na sběrnici jej uvede do provozu. Ve chvíli kdy se v přijímacím bufferu (vyrovnávací paměti) nachází celá zpráva, je předána dále pro dekodování a provedení příslušné operace. Jestliže si případná operace žádá odpověď, je tato odpověď předána k zakódování. Odpověď se dále předá do odesílacího bufferu a je odeslána na sběrnici.

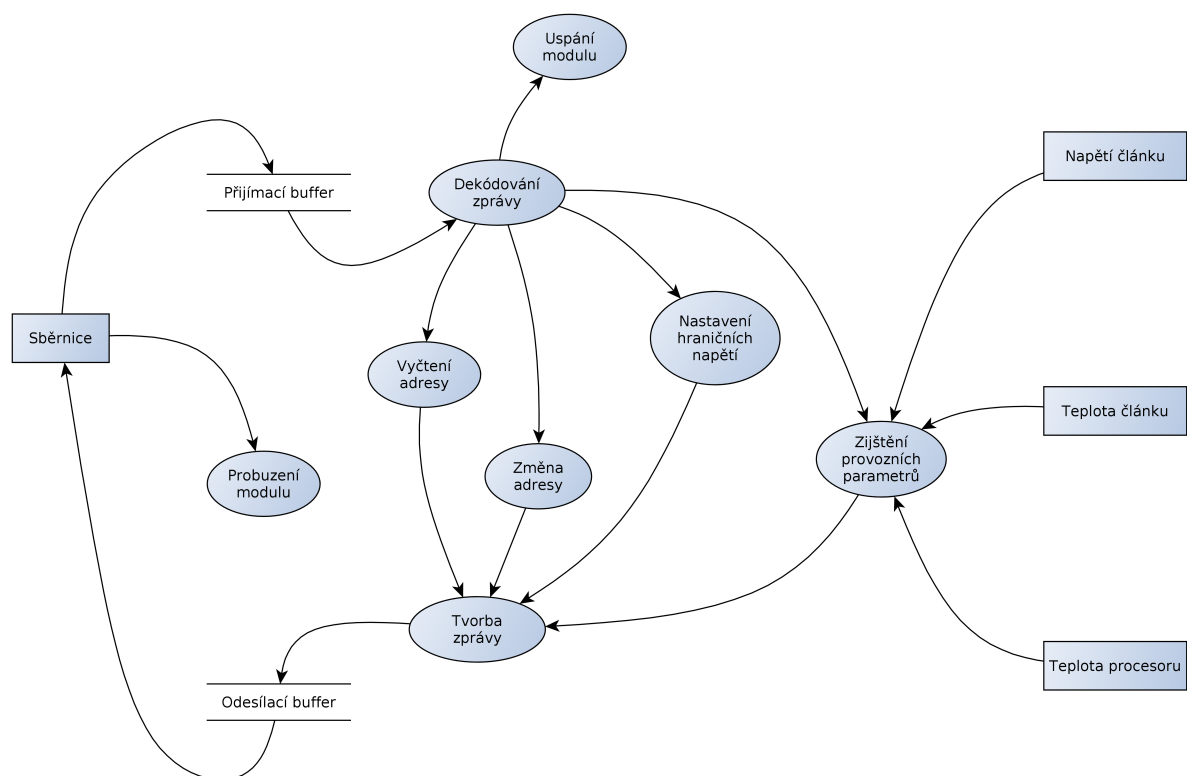
#### 5.4.1 Optočleny

Jako vhodný oddělovací element byl zvolen optočlen PC817[9]. Největší kritérium při výběru hrála cena. Dalším zohledněným faktorem byly časy náběžné a sestupné hrany. Tento parametr je důležitý zejména v poměru k délce přenášeného bitu.

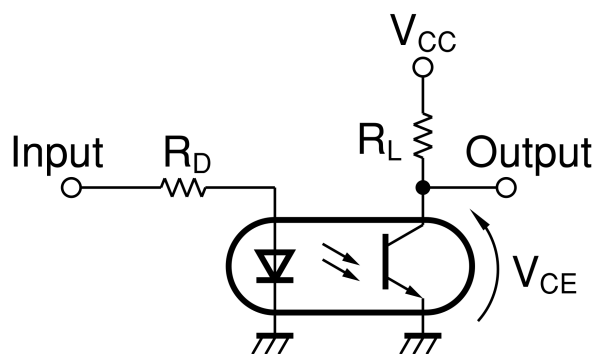
$$\frac{t_{on} + t_{off}}{t_{bit}} 100 = \frac{4 + 3}{104} 100 = 6,73\%$$

Toto zkreslení je v praxi přijatelné hlavně díky sofistikovanému modulu UART, který se nachází v mikrokontroléru Atmega 48.

Parametry optočlenu byly ověřeny měřením, u kterého se vycházelo z katalogového zapojení (obrázek 17). Při měření byl z důvodu názornosti invertován vstupní signál. Ukázalo se, že katalogové zapojení je nevhodné z hlediska odezvy na vstupní signál a velké závislosti pracovního bodu na vstupním napětí. Přitom odolnost vůči změně napájecího napětí je v této aplikaci klíčová, vzhledem ke změně napájecího napětí balančního modulu, v průběhu nabíjení a vybíjení článků.

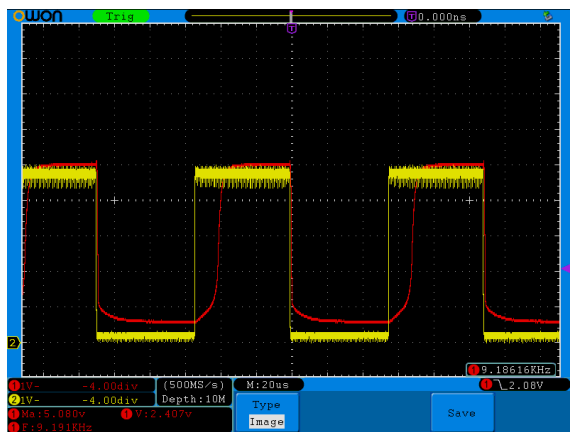


Obrázek 16: Diagram datových toků balančního modulu

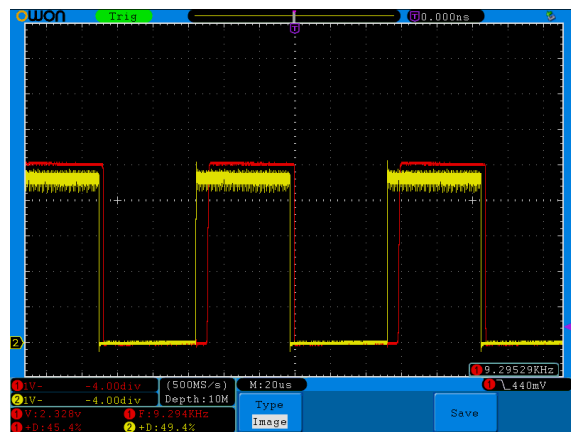


Obrázek 17: Schéma zapojení optočlenu (převzato z: [9])

Problémy se závislostí odezvy optočlenu na napájecím napětí, byly ve finálním zapojení odstraněny. V katalogovém zapojení (obrázek 17) byly rezistory nahrazeny proudovými zdroji. Výsledky měření jsou znázorněny na obrázcích 18, 19 a 20.

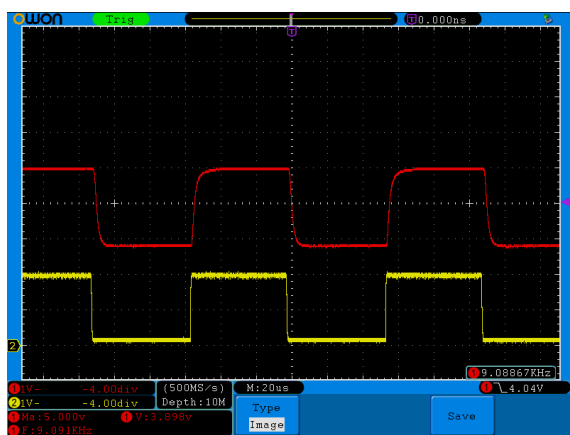


(a) Zapojení s rezistory

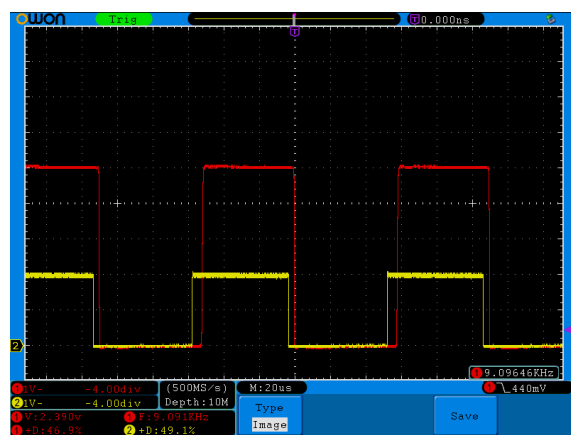


(b) Zapojení s proudovými zdroji

Obrázek 18: Přechodová charakteristika optočlenu s napájením 5 a 5V

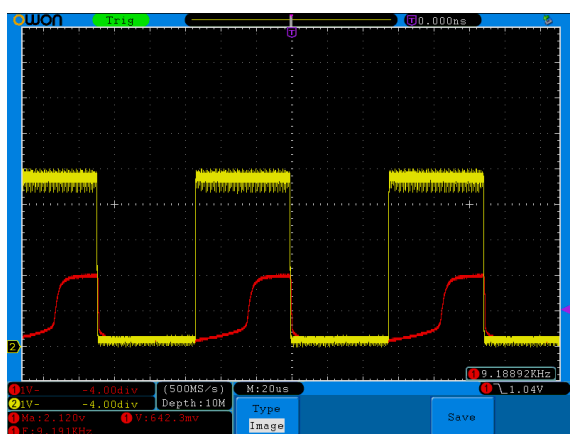


(a) Zapojení s rezistory

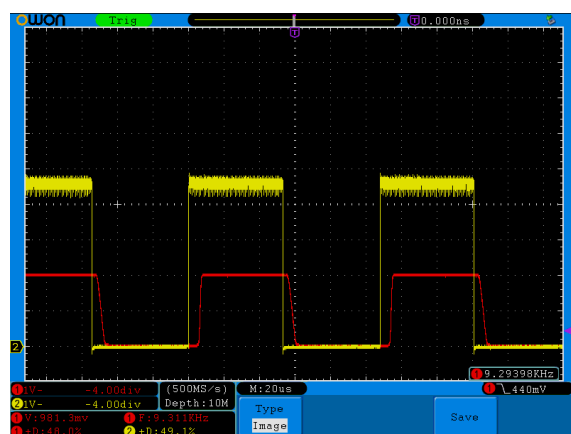


(b) Zapojení s proudovými zdroji

Obrázek 19: Přechodová charakteristika optočlenu s napájením 2 a 5V



(a) Zapojení s rezistory



(b) Zapojení s proudovými zdroji

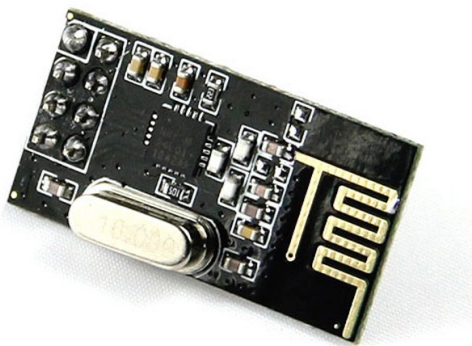
Obrázek 20: Přechodová charakteristika optočlenu s napájením 5 a 2 V



### 5.4.2 Bezdrátová radiová komunikace

Pro testování bezdrátové komunikace byly vybrány moduly (obrázek 21) které jsou založeny na čipu nRF24L01+ [10]. Tyto moduly komunikují v bezlicenčním pásmu 2.4 GHz a jsou navrženy pro minimální spotřebu a přenosové rychlosti až 2 Mb/s. Podrobná specifikace:

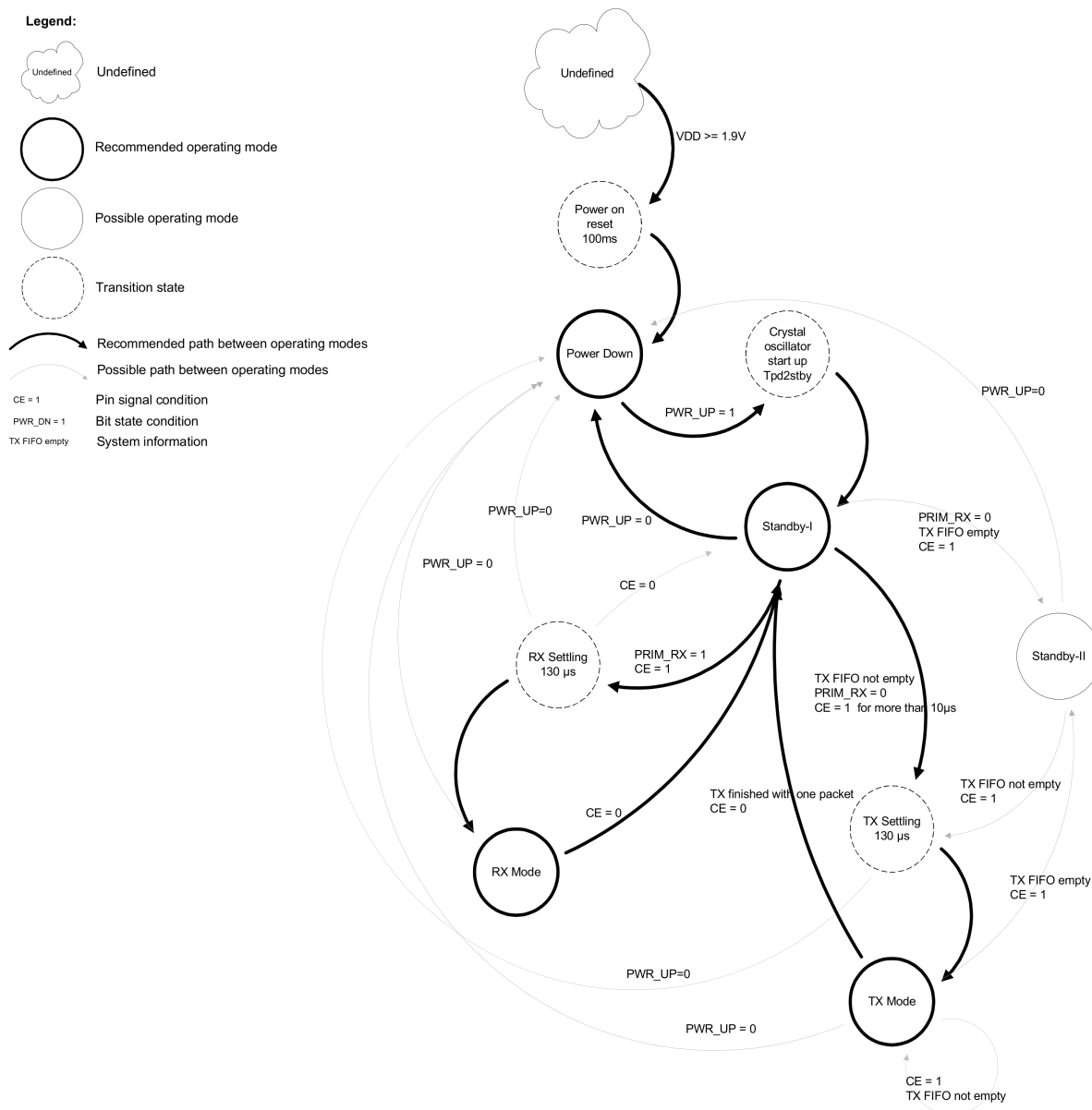
- přenosové rychlosti 250 kb/s, 1 Mb/s a 2 Mb/s v závislosti na síle signálu,
- spotřeba 11,3 mA při vysílání a výstupním výkonu 0 dBm,
- spotřeba 13,5 mA při příjmu rychlostí 2 Mb/s,
- spotřeba ve vypnutém stavu 900 nA,
- rozsah napájecího napětí 1,9 - 3,6 V,
- 5 V tolerantní vstupy,
- automatické zpracování paketu,
- nízká cena.



Obrázek 21: Bezdrátový modul s čipem nRF24L01+

Pro komunikaci tohoto modulu s mikrokontrolérem je využito rozhraní SPI. Na obrázku 22 je znázorněn diagram stavů ve kterých se modul nRF24L01+ může nacházet.

Komunikace pomocí modulů pak probíhá následovně:



Obrázek 22: Stavový diagram nRF24L01+ (převzato z: [20])

- inicializace modulu do stavu pro příjem - modul neustále demoduluje příchozí signály a snaží se najít validní rámec, v případě že uspěje je tento rámec uložen do přijímacího bufferu,
- z přijímacího bufferu jsou data vyčtena do mikrokontroléru a zpracována stejným způsobem jako u komunikace pomocí sběrnice UART,

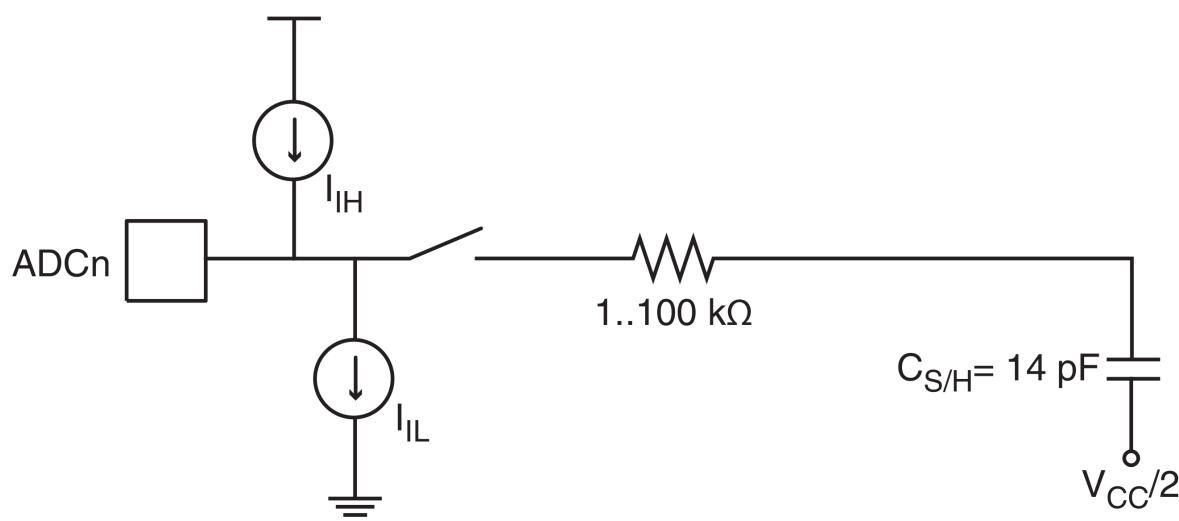
- pro odpověď je modul překonfigurován do stavu vysílání a data k odeslání jsou nahrány do jeho vysílacího bufferu, modul se poté postará o odeslání těchto dat.

Moduly při testování poskytly spolehlivý komunikační kanál mezi balančními moduly a řídicí jednotkou. Využití bezdrátové komunikace pro BMS elektrického vozidla je však diskutabilní. Při vjezdu vozidla do míst s vysokým rušením v oblasti komunikačního pásma by mohlo dojít ochromení funkce BMS. Je nutno také zvážit cenu tohoto řešení. I když se jedná zřejmě o jednu z nejlevnějších alternativ v oblasti bezdrátové komunikace, cena 100 Kč za samotný čip je pětinasobný výdaj oproti součástkám pro galvanické oddělení pomocí optočlenů.

## 5.5 Měření provozních parametrů článku

Pro měření provozních parametrů článků je využito A/D převodníku integrovaného v mikrokontroléru Atmega 48. Mikrokontrolér má také integrovanou napěťovou referenci 1,1 V. Maximální napětí akumulátoru je 3,65 V. V případě kdybychom použili akumulátory typu Li-Pol by napětí mohlo dosáhnout až 4,2 V. Z tohoto důvodu byl navržen odporový dělič s poměrem 1:4,09. Maximální naměřitelné napětí tak je 4,499 V a rozlišení při 10 bitovém převodu činí 4,39 mV. Vybíjecí proud, který bude trvale protékat odporovým děličem, pak při 3,6 V bude 4  $\mu$ A.

Pro kompenzaci vysoké hodnoty rezistorů v odporovém děliči k měření napětí je nutné paralelně ke vstupnímu pinu A/D převodníku připojit kondenzátor. Pokud budeme chtít, aby naměřená hodnota byla ovlivněna o méně než 0,1 %, musí být kapacita takového kondenzátoru 1000x větší než kapacita Sample/Hold kondenzátoru (obrázek 23) na vstupu A/D převodníku.

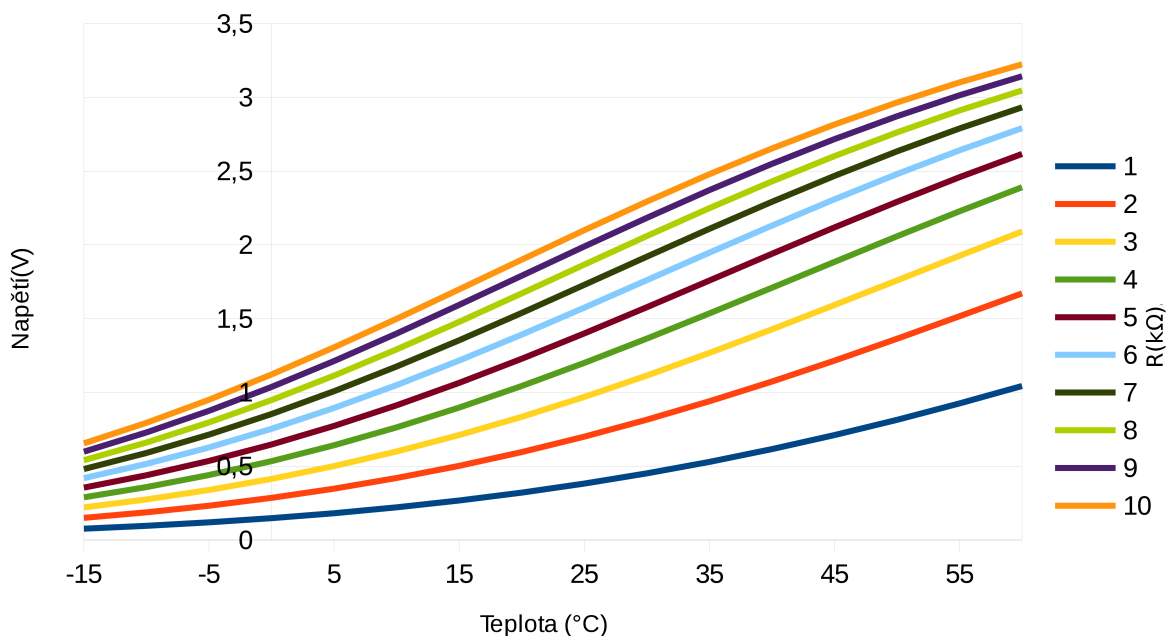


Obrázek 23: Vnitřní zapojení vstupního pinu A/D převodníku (převzato z: [8])

$$C \geq C_{S/H} \cdot 1000 = 14 \text{ pF} \cdot 1000 = 14 \text{ nF}$$

Jelikož tato hodnota není kritická, byl pro snížení počtu hodnot u součástek v zapojení použit kondenzátor o kapacitě 100 nF.

Pro měření teploty byl zvolen termistor NTC o hodnotě 10 k $\Omega$ . Z důvodu nelinearity termistoru byla pro určení hodnoty pull-down rezistoru provedena simulace v rozsahu teplot -15 - 60 °C. Napájecí napětí pro simulaci bylo zvoleno 4,2 V a její výsledek je možno vidět na obrázku 24. Jak již bylo zmíněno maximální přípustné napětí na vstupu A/D převodníku je 1,1 V. Z grafu tedy vyplývá, že optimální hodnota pull-down rezistoru je 1 k $\Omega$ .



Obrázek 24: Simulace měření teploty

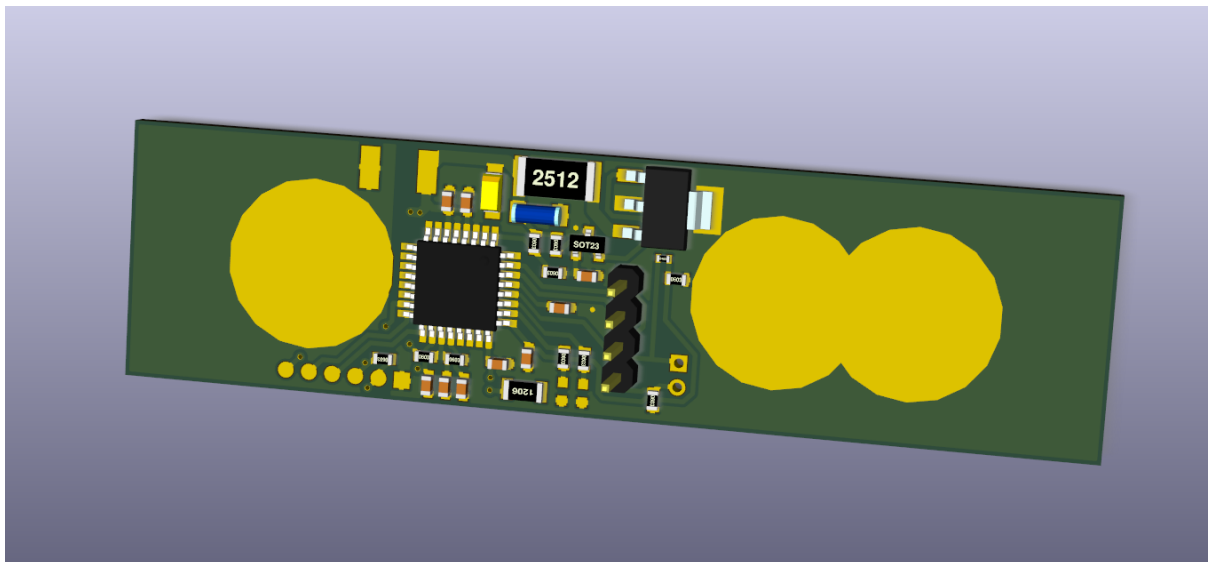
## 5.6 Návrh DPS

Při návrhu DPS byl kladen důraz na jednoduchost instalace. Modul balanční jednotky se proto montuje přímo na kontakty jednotlivých článků. Tím je zároveň jednoduše vyřešeno elektrické připojení i mechanické uchycení balančního modulu. Po namontování balančních modulů a sériovém propojení článků je potřeba balanční moduly propojit komunikační sběrnici. Celý systém je tak velice nenáročný na kabeláž.

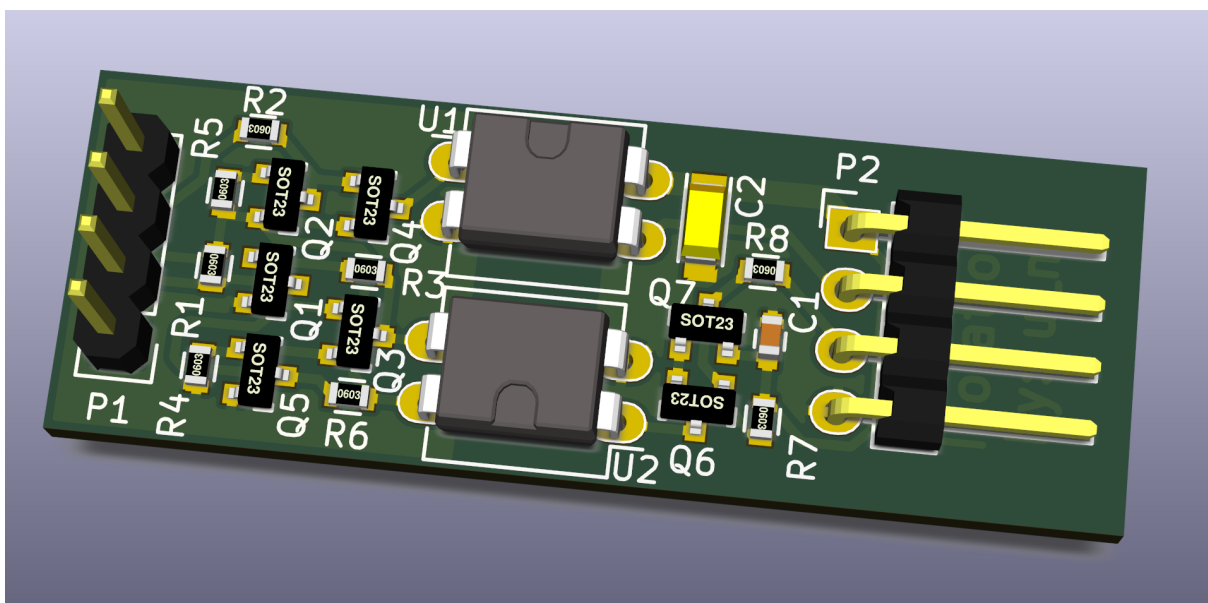
Balanční modul byl rozdělen na dvě části:

- hlavní desku (obrázek 25) - ta obsahuje řídicí logiku, výkonovou část a měření parametrů článku,

- modul galvanického oddělení (obrázek 26) - obsahuje optočleny a podpůrné obvody, lze jej vyměnit za modul bezdrátové komunikace, který posléze využije navíc i piny určené k programování balančního modulu.



Obrázek 25: Modul balanceru



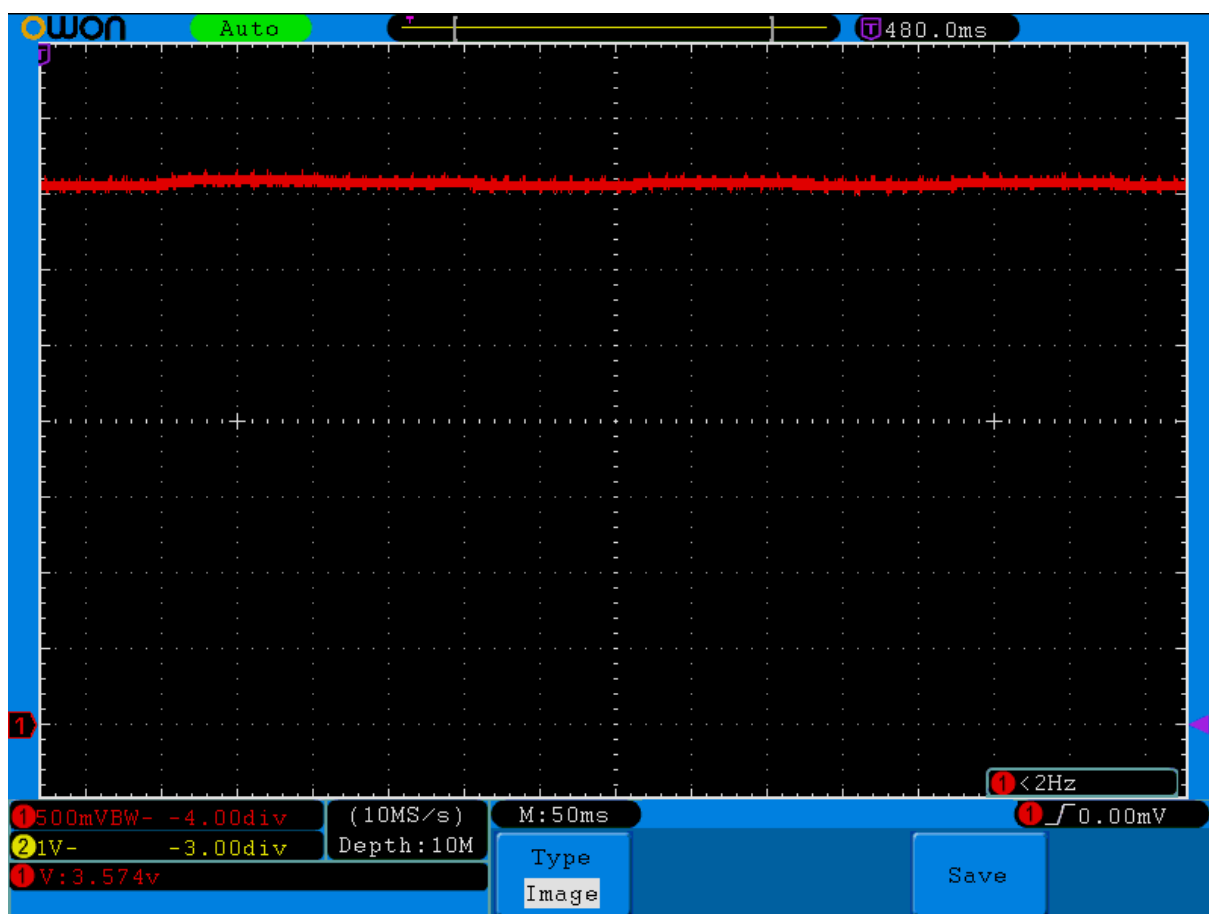
Obrázek 26: Modul galvanického oddělení

## 5.7 Testy

Testování bylo zaměřeno hlavně na schopnost balančního modulu omezit napětí článku. Úvodní testy byly provedeny jako omezení napětí laboratorního zdroje s nastavenými výstupními parametry:

- výstupní napětí 4 V,
- proudové omezení 500 mA.

Obrázek 27 ukazuje stabilitu a přesnost omezení napětí, při balancování na úroveň 3,6 V.



Obrázek 27: Výsledek testů balančního modulu

## 6 Řídicí jednotka

Řídicí jednotka je centrálním prvkem BMS. Shromažďuje provozní informace z balančních modulů, proudového senzoru a nadřazeného systému. Jejím hlavním cílem je zabránit poškození baterie. Musí tedy zajistit ochranné funkce:

- ochrana proti přebití - je realizována primárně balančními moduly, řídicí jednotka však musí snížit nabíjecí proud tak, aby byly balanční moduly schopny, odvádět nabíjecí proud mimo nabitý článek,
- ochrana proti podbití - v případě že napětí článku poklesne pod mez stanovenou pro vybitý článek, musí řídicí jednotka odpojit zátěž,
- ochrana proti nadproudu - pokud odběr zátěže překročí maximální špičkový proud, případně maximální trvalý proud po dobu delší než je maximální doba špičkového proudu, musí řídicí jednotka odpojit zátěž,
- tepelná ochrana - jestliže teplota některého z článků překročí kritickou hodnotu, musí řídicí jednotka odpojit zátěž.

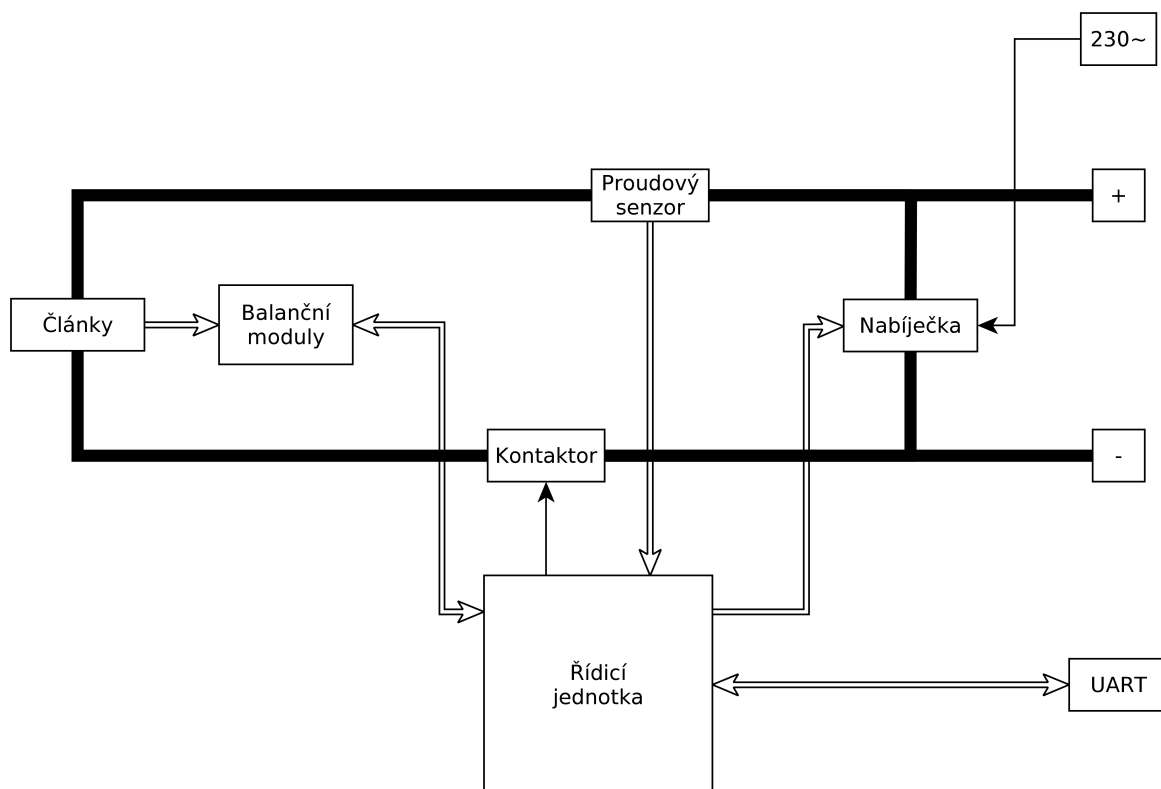
Z blokového schématu zapojení BMS (obrázek 28) je zřejmé, že řídicí jednotka má ke splnění výše uvedených požadavků hned několik možností zásahu:

- úprava provozních parametrů zátěže - řídicí jednotka poskytuje veškeré informace o baterii prostřednictvím komunikačního rozhraní UART (viz. 4.2), pokud dokáže zátěž tyto informace vyhodnotit a předejít kritickému stavu, nemusí řídicí jednotka přistoupit k dalším krokům,
- omezení či vypnutí nabíjecího proudu - řídicí jednotka má možnost upravit parametry nabíjení v závislosti na stavu nabití baterie a její teplotě,
- odpojení zátěže - v případě, že se některý z parametrů baterie ocitne mimo provozní limity, může řídicí jednotka odpojit zátěž pomocí kontaktoru.

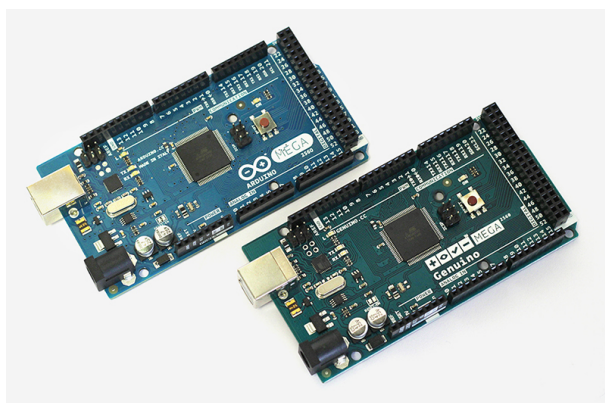
### 6.1 Hardware

Jako základ pro řídicí jednotku byla zvolena vývojová platforma Arduino MEGA 2560 (obrázek 29), která obsahuje výkonný procesor s architekturou AVR a dostatečný počet komunikačních rozhraní. Tato platforma integruje mikrokontrolér Atmega 2560, převodník USB/UART, napájecí a podpůrné obvody.

Při výběru proudového senzoru bylo přihlédnuto k zamýšlenému použití BMS v elektrické koloběžce. V této aplikaci budou dosahovat odebírané proudy 60 A. Je zde také nutno počítat s možnou rekuperací elektrické energie. Jako proudový senzor byl tedy vybrán modul společnosti Pololu integrující obvod ACS709 (obrázek 30), který disponuje těmito parametry:



Obrázek 28: Blokové schéma zapojení řídicí jednotky



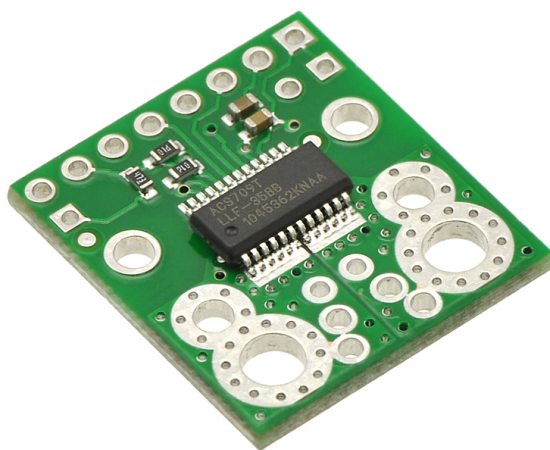
Obrázek 29: Vývojová platforma Arduino MEGA 2560 (převzato z: [17])

- rozsah měřeného proudu -75 - 75 A
- napájecí napětí 3 - 5 V,
- izolační pevnost až 2,1 kV,



- vnitřní odpor 1,1 m $\Omega$ ,
- nastavitelná signalizace nadproudu,
- šířka pásma až 120 kHz, dá se omezit kondenzátorem.

Signál z tohoto proudového senzoru je vyhodnocován pomocí A/D převodníku.

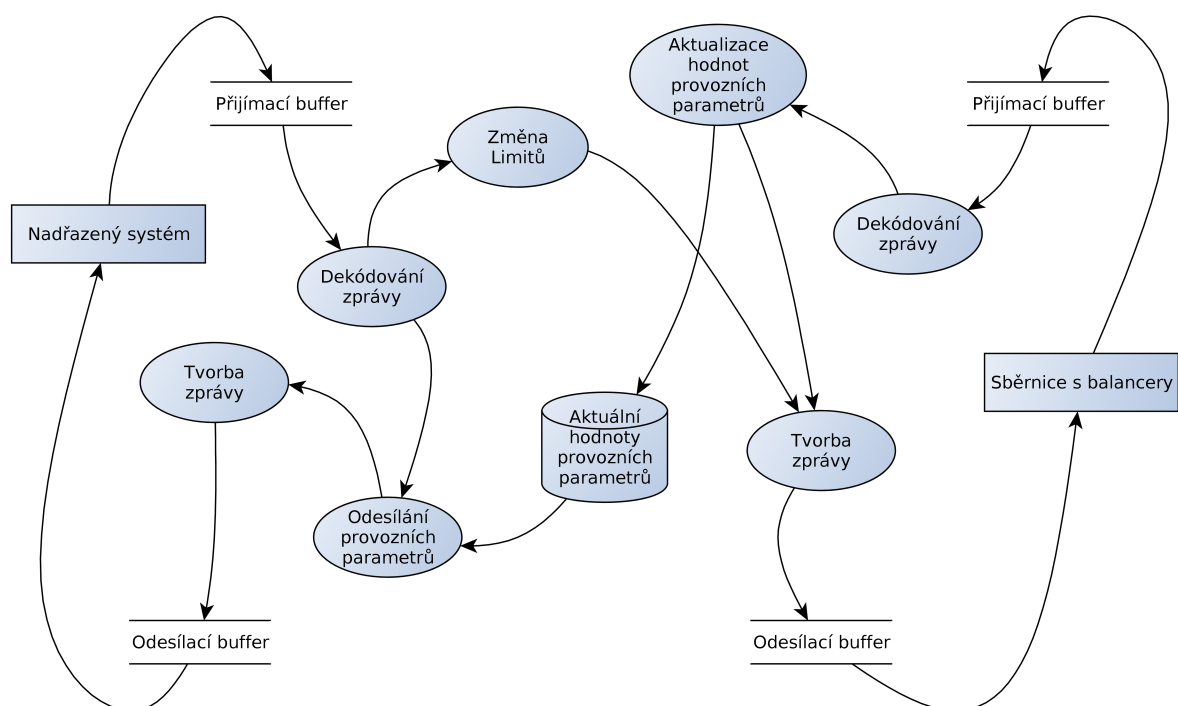


Obrázek 30: Modul proudového senzoru (převzato z: [18])

Na místě kontaktoru je použito automobilové relé. Jedná se o typ NVF4-4C-Z60a, který je schopen spínat proudy až 60 A. Aby mohlo být toto relé spínáno pomocí Arduina, byl jeho výstup posílen spínacím tranzistorem.

## 6.2 Komunikace

Na obrázku 31 můžeme vidět vnitřní datový tok řídicí jednotky. Řídicí jednotka v sobě obsahuje paměť aktuálních hodnot provozních parametrů. Ta je aktualizována daty z balančních modulů, které jsou pomocí sběrnice cyklicky oslovovány. Shromážděná data jsou posléze odeslána nadřazenému systému. Pokud chce nadřazený systém upravit limitní hodnoty provozních parametrů, přijímá řídicí jednotka tento požadavek a pošle nové hodnoty balančním modulům.



Obrázek 31: Diagram datových toků řídicí jednotky

## 7 Vizualizace

Pro potřeby prezentace provozních údajů BMS byl vytvořen vizualizační systém. Ten umožňuje zobrazit aktuální měřené hodnoty parametrů baterie. Lze jej však také využít k servisním účelům, ke správě balančních modulů a nastavení limitních hodnot. Vizualizace se chová jako nadřazený systém BMS (viz. kapitola 4.2).

Jelikož se předpokládá, že vizualizace bude používána především pro práci v terénu, byla vyvinuta pro, v dnešní době nejrozšířenější mobilní operační systém, Android. Primární určení pak z důvodu pohodlnosti obsluhy cílí na tablety. S drobnými změnami by šla provozovat i na telefonech. Komunikační kanál s BMS zajišťuje převodník USB/UART. Ten se připojuje do USB-OTG portu tabletu.

### 7.1 Android

Android je open-source operační systém postavený kolem linuxového jádra. Jeho počátky se datují do roku 2005, v roce 2007 byl odkoupen firmou Google, která jej vyvíjí dodnes. Primárně se zaměřuje na mobilní platformy, a je optimalizován pro nízké požadavky na výpočetní výkon a paměť. Postupem času si získal oblibu a v dnešní době má majoritní podíl na trhu s mobilními platformami.

Aplikace pro Android jsou psány v jazyce Java. Grafický návrh se zaznamenává do XML souboru. Zdrojové soubory se dělí na:

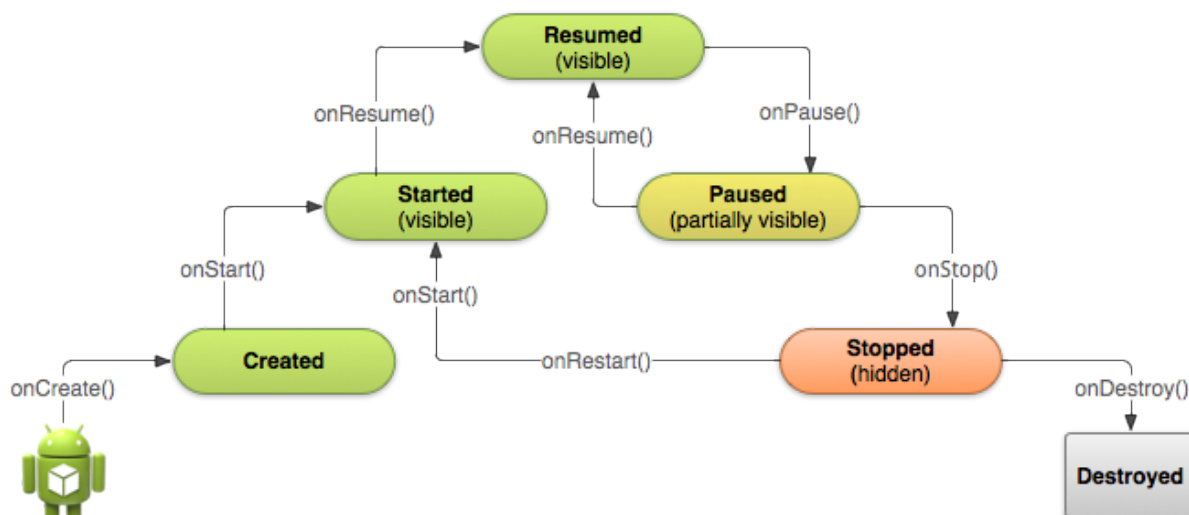
- manifest - xml soubor který popisuje součásti aplikace, metody spouštění a přístupová práva,
- třídy java - obsahují samotnou funkcionalitu programu,
- layout - XML soubory popisující vzhled aplikace,
- resources - zdrojové soubory grafických prvků a textů.

Aplikace se pak může skládat z několika druhů prvků:

- aktivita - část aplikace, která obsahuje grafické uživatelské rozhraní, se skládá z layoutu a třídy Java,
- služba - část aplikace která nemá grafické rozhraní se používá pro běh výpočetně náročných operací na pozadí,
- content provider - umožňuje výměnu dat mezi aplikacemi,
- broadcast receiver - slouží k zachycení oznámení a reakci na něj (například příchozí SMS, připojení OTG zařízení, ...).

## 7.2 Rozdělení aplikace

Každá aktivita v Androidu má svůj životní cyklus (obrázek 32). Jak můžeme vidět na obrázku jedná se o životní cyklus poměrně komplikovaný. Typicky provádí aktivita nejvíc úkonů při inicializaci a zastavení. V této chvíli je totiž nutné vykreslit veškeré grafické prvky a naplnit je daty.



Obrázek 32: Životní cyklus aktivity (převzato z: [19])

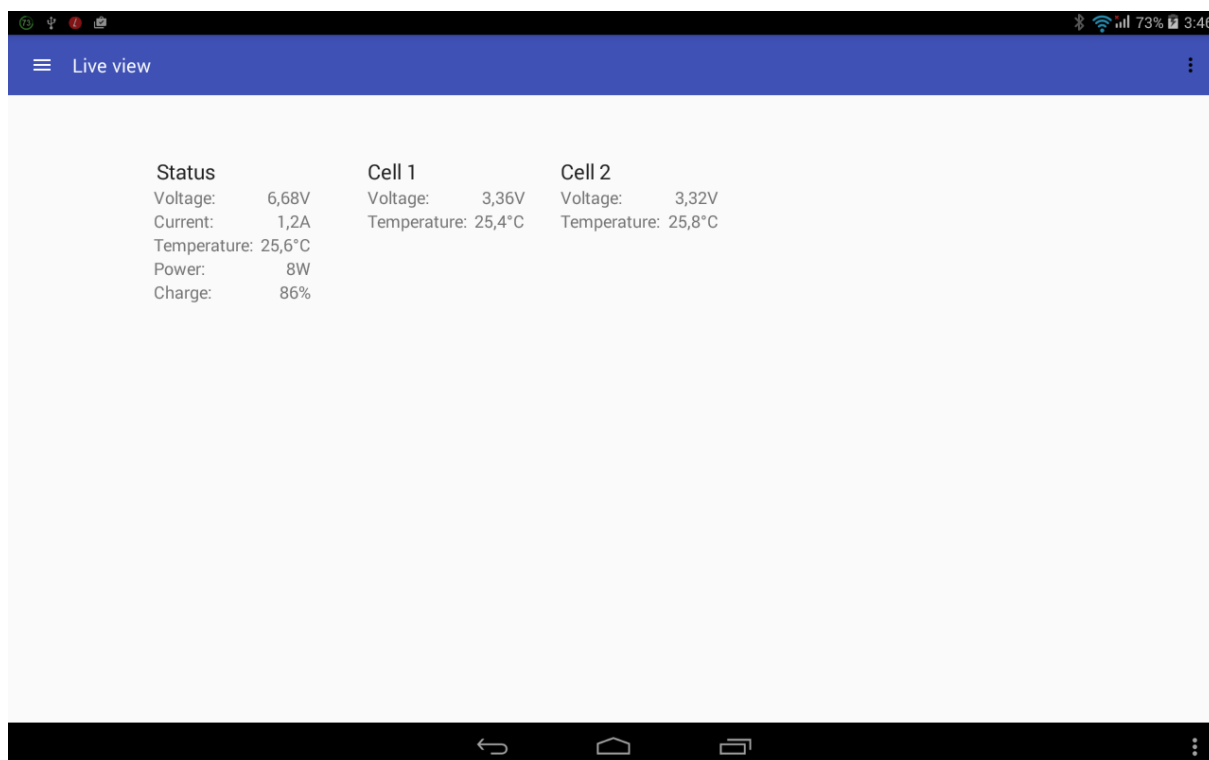
Ve chvíli kdy chceme aplikaci přepnout mezi aktivitami, které mají hodně stejných prvků, dochází k neefektivnímu využití prostředků. Tyto prvky totiž musí být zahozeny a posléze znova inicializovány. V případě, že by si měly pamatovat stav ve kterém se v původní aktivitě nacházely, bylo by potřeba tento stav mezi aktivitami předat. Naštěstí Android nabízí pro tuto situaci efektivnější nástroj, fragmenty.

Fragment je část grafického rozhraní, která může být vložena do aktivity až v průběhu činnosti. Jeho životní cyklus je podřazen životnímu cyklu aktivity, může však být také ovládán samotnou aktivitou. To umožňuje přepínání různých fragmentů v rámci jedné aktivity.

Jelikož navrhnutá vizualizační aplikace obsahuje navigační menu a toolbar, který je stejný pro všechny obrazovky, je pro přepínání těchto obrazovek využito právě fragmentů.

### 7.3 Live view

Slouží pro sledování aktuálních parametrů baterie (viz. obrázek 33).



The screenshot shows a mobile application interface titled 'Live view'. It displays a table of battery parameters. The table has four columns: 'Status', 'Cell 1', and 'Cell 2'. The 'Status' column lists global battery metrics, while 'Cell 1' and 'Cell 2' list individual cell metrics. The data is as follows:

Status	Cell 1	Cell 2
Voltage: 6,68V	Voltage: 3,36V	Voltage: 3,32V
Current: 1,2A	Temperature: 25,4°C	Temperature: 25,8°C
Temperature: 25,6°C		
Power: 8W		
Charge: 86%		

Obrázek 33: Ukázka fragmentu sledování provozních parametrů

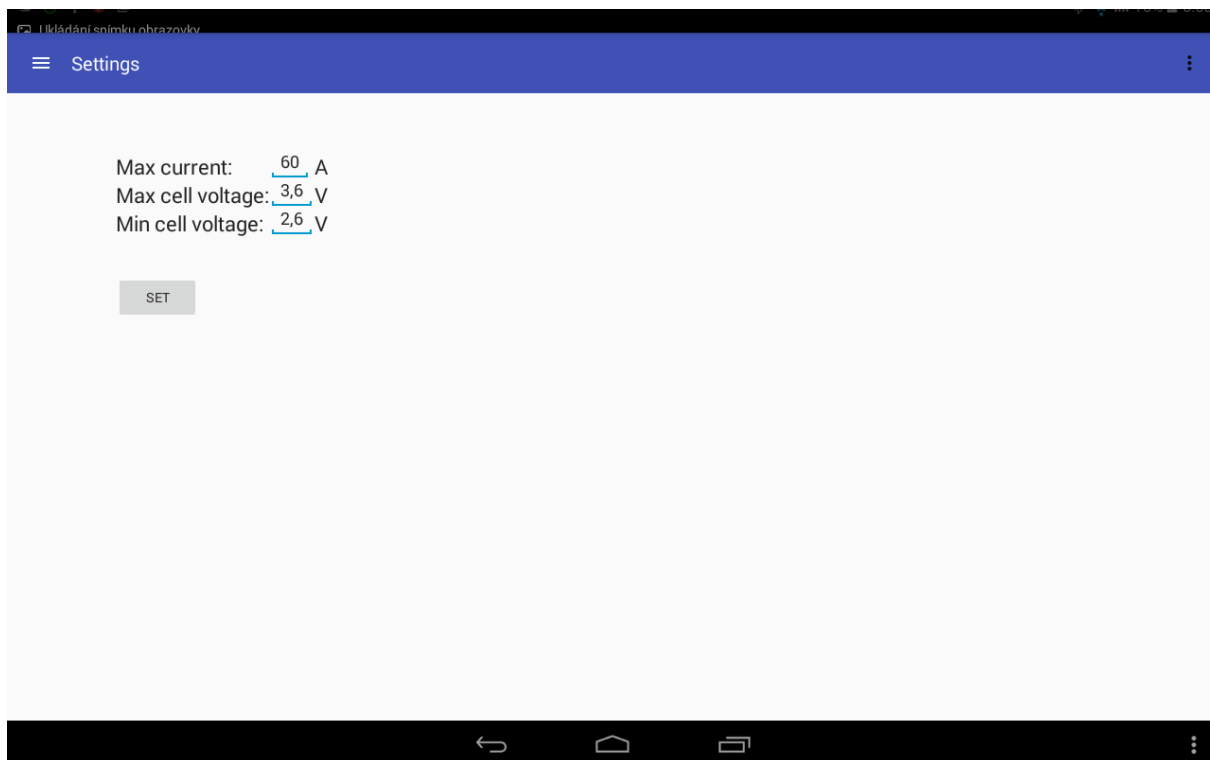
V kolonce status jsou znázorněny globální hodnoty pro celou baterii.

- Voltage - součet napětí všech článků.
- Current - proud tekoucí baterií.
- Temperature - průměrná teplota článků.
- Power - výkon dodávaný baterií.
- Charge - stav nabití.

V dalších kolonkách (Cell 1, ... , Cell n) jsou vypsány hodnoty parametrů jednotlivých článků.

## 7.4 Settings

Slouží k nastavení provozních limitů baterie (viz. obrázek 34).



Obrázek 34: Ukázka fragmentu nastavení limitů

Lze zde nastavit:

- max current - hodnotu maximálního proudu baterie, pokud odběr tuto hodnotu překročí BMS odpojí zátěž,
- max cell voltage - maximální hodnota napětí na článku, při dosažení této hodnoty se sníží nabíjecí proud a příslušný balanční modul zabrání dalšímu navyšování napětí,
- min cell voltage - minimální hodnota napětí článku, při poklesu napětí pod tuto úroveň na kterémokoli z článků baterie, odpojí BMS zátěž.

## 7.5 Console

Console je diagnostický nástroj, jenž umožňuje vidět všechny informace, které BMS posílá v surové formě. Je zde také implementován algoritmus pro odesílání zpráv (viz. obrázek 35).



Obrázek 35: Ukázka fragmentu Console

## 8 Závěr

V rámci diplomové práce jsem navrhl systém balančních modulů určený pro akumulátory typu Li-FePO<sub>4</sub>. Úkolem systému je zajistit bezpečný provoz těchto akumulátorů. Aby toho byl systém schopen, navrhl jsem způsob měření provozních parametrů akumulátoru a jejich regulace. Výsledný návrh je po funkční stránce rovnocenný se systémy dostupnými na trhu, je však výhodnější z cenového hlediska. Jednou z největších předností je kompaktnost balančního modulu. Návrh jsem uzpůsobil snadné instalaci a tak modul vyplňuje místo mezi kontakty akumulátoru. Všechny moduly jsou propojeny čtyřvodičovou sběrnicí, která výrazně zjednodušuje zapojení baterie. Není totiž třeba vést od každého článku samostatný vodič pro balancování napětí, což je výhoda především u baterií s velkým počtem článků.

Návrh balančního modulu jsem rozdělil na dvě samostatné části. Jedna z nich má za úkol měření provozních parametrů článku a balancování. Druhá je rozhraním pro komunikaci mezi balančními moduly a řídicí jednotkou. Tento návrh mi umožnil jednoduše testovat různé druhy komunikace.

Pro komunikaci mezi balančními moduly jsem testoval dvě rozhraní. V prvním případě se jednalo o UART. Pro toto rozhraní jsem s využitím optočlenů navrhl galvanické oddělení. Jednotlivé balanční moduly totiž nemohou být spojeny přímo, protože každý z nich se napájí z článku, ke kterému je upevněn. V důsledku toho má každý balanční modul jiný zemní potenciál. Testoval jsem také bezdrátovou komunikaci za pomoci bezdrátových modulů postavených na integrovaných obvodech firmy Nordic. Řešení s těmito moduly je dražší, dovedu si však představit využití v rozsáhlých průmyslových aplikacích, kde je možno regulovat rušení v oblasti komunikačního pásma modulů. V případě požadavku na balanční moduly, které budou komunikovat pouze bezdrátově, by bylo ekonomicky výhodnější použít mikrokontrolér s integrovaným bezdrátovým rozhraním.

Budoucím rozvinutím této práce by mohla být implementace rozhraní pro velmi zarušené prostředí. Například RS485 nebo CAN by byly vhodnými kandidáty pro tento úkol. Návrh řídicí jednotky BMS by také mohl být přepracován do podoby monolitické jednoúčelové desky. Výsledná jednotka by tak mohla být kompaktnější nebo poskytovat více možností připojení. Pro monitorování stavu nabití elektrického vozidla by mohlo být použito například připojení pomocí sítě GSM. Uživatel by tak mohl kontrolovat informace o stavu baterie vzdáleně. Všechny tyto úpravy jsou však nad rámec zadání.

Výsledný systém navržený v rámci této práce bude použit při realizaci projektu elektrické koloběžky. Od začátku byl koncipován pro využitelnost v praxi resp. v tomto konkrétním projektu.



## Literatura

- [1] RAHN, Christopher D. a Chao-Yang WANG. *Battery Systems Engineering*. 1st ed. Wiley, 2013. ISBN 978-1-119-97950-0
- [2] POP, V., H. J. BERGVELD, D. DANILOV, P.P.L. REGTIEN a P.H.L. NOTTEN. *Battery Management Systems: Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications*. Philips Research Book Series (Book 9) Springer, 2008. ISBN 978-1402069444
- [3] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry Atmel AVR ATmega16: měření, řízení a regulace pomocí několika jednoduchých přípravků*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 319 s. ISBN 80-7300-174-8.
- [4] HORÁK, B., K. FRIEDRISCHKOVÁ, J. KAZÁRIK, J. NOWAKOVÁ a Z. SLANINA. *Elektromobilita II, učební text*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3532-7. Dostupné z: [http://netfei.vsb.cz/downloads/autorske\\_texty/Elektromobilita%20II.pdf](http://netfei.vsb.cz/downloads/autorske_texty/Elektromobilita%20II.pdf).
- [5] AVR307: Half Duplex UART Using the USI Module. *Atmel* [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc4300.pdf>
- [6] ATtiny13A. *Atmel* [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc8126.pdf>
- [7] ATtiny44A. *Atmel* [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: [www.atmel.com/Images/doc8183.pdf](http://www.atmel.com/Images/doc8183.pdf)
- [8] ATmega48P. *Atmel* [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: [www.atmel.com/Images/doc8025.pdf](http://www.atmel.com/Images/doc8025.pdf)
- [9] PC817 [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/523/202/pc817c-sharp-datasheet-2.pdf>
- [10] nRF24L01+ [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: [http://www.nordicsemi.com/eng/nordic/download\\_resource/8765/2/77927288](http://www.nordicsemi.com/eng/nordic/download_resource/8765/2/77927288)
- [11] Katalog prodejce [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://esku.cz/cs/bms-balancery/285-simple-battery-management-pro-16-clanku-48v-10a.html>
- [12] Katalog prodejce [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://esku.cz/cs/bms-balancery/103-balancni-modul-pro-lifepo-360v-17a.html>
- [13] BMS MGM compro [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.mgm-compro.cz/portfolio/bms-battery-management-systemy>

- [14] Datasheet BMS-2 [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: [http://www.faktor.de/out/media/BMS\\_02\\_V5\\_010313\\_ENG\\_n.pdf](http://www.faktor.de/out/media/BMS_02_V5_010313_ENG_n.pdf)
- [15] Datasheet GWL-ZG-LFP020AH [online]. [cit. 2016-04-12]. Dostupné z: <http://www.ev-power.eu/docs/web/2014/GWL-ZG-LFP020AH-Spec.pdf>
- [16] Improving absolute precision of ADC to balance battery voltage. *Electrical Engineering Stack Exchange* [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://electronics.stackexchange.com/questions/63948/improving-absolute-precision-of-adc-to-balance-battery-voltage>
- [17] Arduino MEGA 2560 [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>
- [18] ACS709 Current Sensor Carrier -75A to +75A [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2199>
- [19] Starting an Activity [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: <http://developer.android.com/training/basics/activity-lifecycle/starting.html>
- [20] nRF24L01+ Product Specification [online]. [cit. 2016-04-25]. Dostupné z: [https://www.nordicsemi.com/kor/nordic/download\\_resource/8765/2/38714584](https://www.nordicsemi.com/kor/nordic/download_resource/8765/2/38714584)

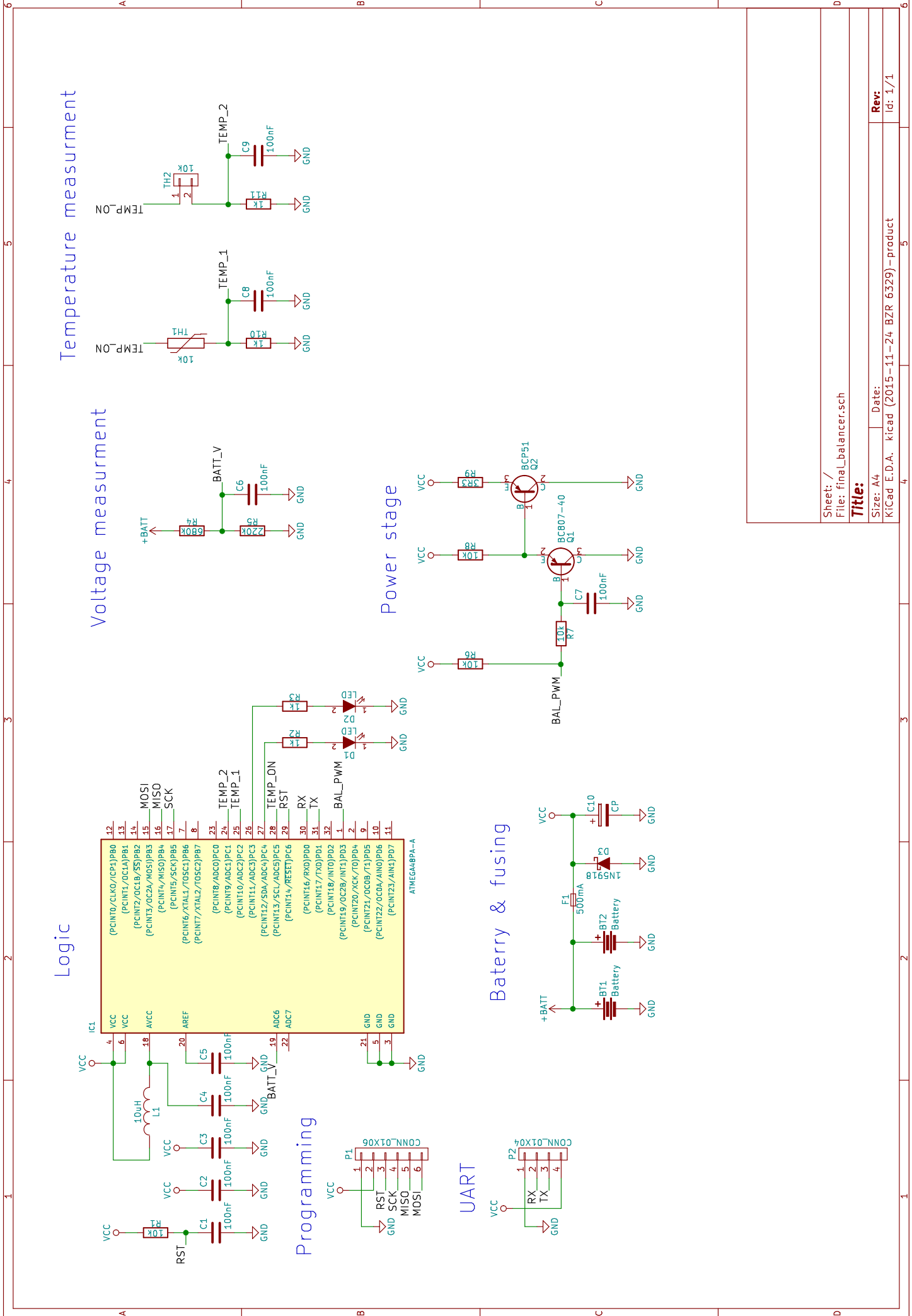
## Seznam příloh

- Rozpočet (Strana I)
- Schéma balančního modulu (Výkres final\_balancer.sch)
- Schéma galvanického oddělení (Výkres final\_isolation.sch)
- Návrh DPS balančního modulu (CD/DVD)
- Návrh DPS galvanického oddělení (CD/DVD)
- Zdrojový kód balančního modulu (CD/DVD)

Balancerů:	100
------------	-----

Komponenta	Počet/balancer	Počet celkem	Cena(Kč)/kus	Cena (Kč) celkem
R 22	1	100	0,25	25
R 33	2	200	0,25	50
R 1k	4	400	0,25	100
R 10k	9	900	0,13	117
R 220k	1	100	0,25	25
R 680k	1	100	0,25	25
C 100nF	10	1000	0,11	110
C 100uF	2	200	2,48	496
LED red	1	100	1,63	163
LED green	1	100	1,43	143
pin header 4	1	100	0,91	91
Molex 4	1	100	1,5	150
BC807	5	500	0,51	255
BC817	3	300	0,66	198
BCP52	1	100	2,37	237
F 500mA	1	100	2,38	238
1N5918	1	100	1,17	117
10uH	1	100	1,3	130
R 3r3/1W	1	100	6,07	607
Atmega48	1	100	21,67	2167
Termistor 10k	2	200	5,4	1080
Optočlen	2	200	2,9	580
DPS	1	100	70	7000
celkem:	53	5300	123,87	14104

Obrázek 1: Náklady na balanční moduly při výrobě série 100ks



Logic

Voltage measurement

Temperature measurement

Programming

Power stage

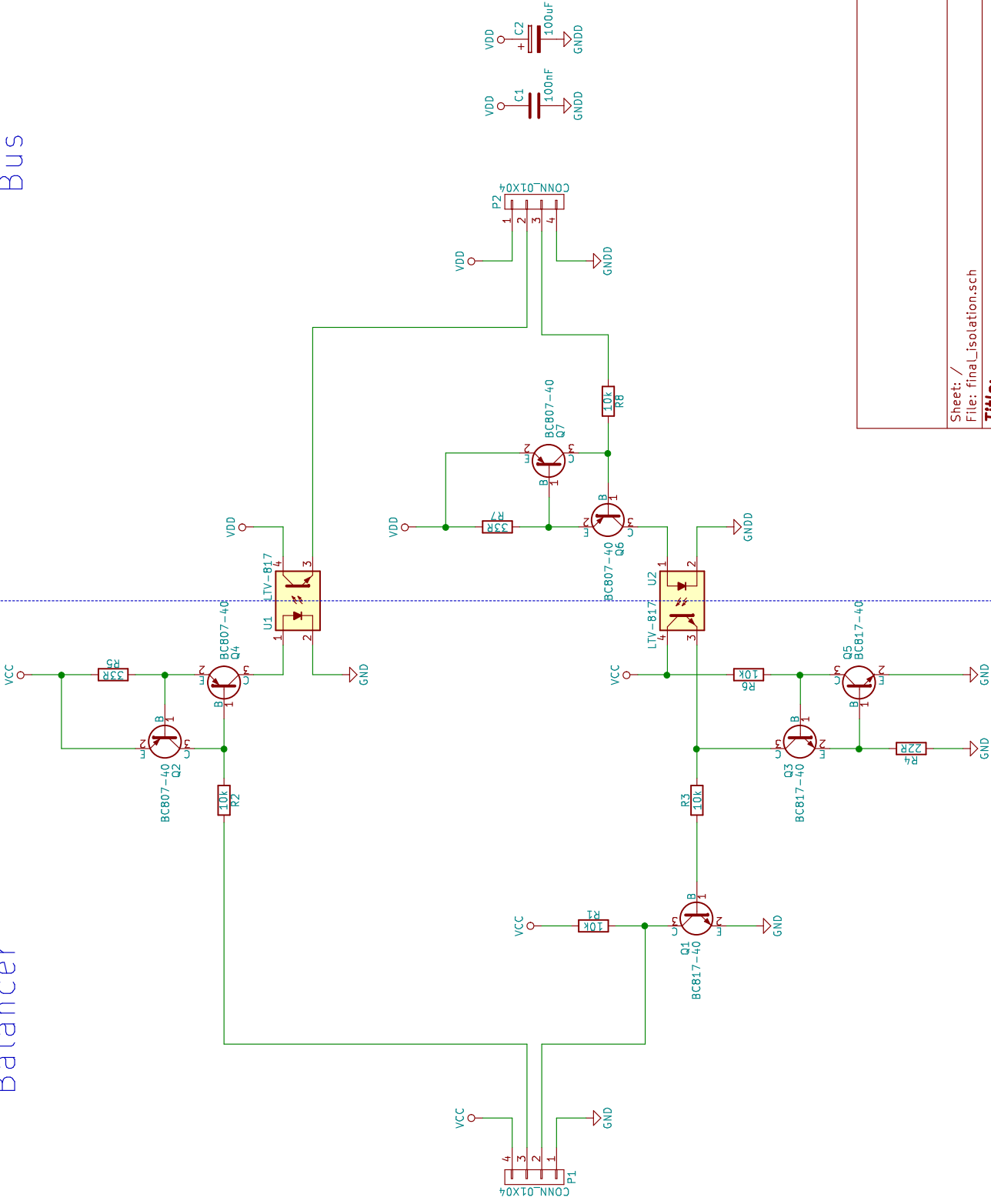
Battery & fusing

UART

Sheet: /	
File: final_balancer.sch	
<b>Title:</b>	
Size: A4	Date:
KiCad E.D.A. kicad (2015-11-24 BZR 6329) - product	
<b>Rev:</b>	
Id: 1/1	

Balancer

Bus



Sheet: /  
File: final\_isolation.sch

**Title:**

Size: A4 Date:

KiCad E.D.A. kicad (2015-11-24 BZR 6329) - product

**Rev:**

Id: 1/1